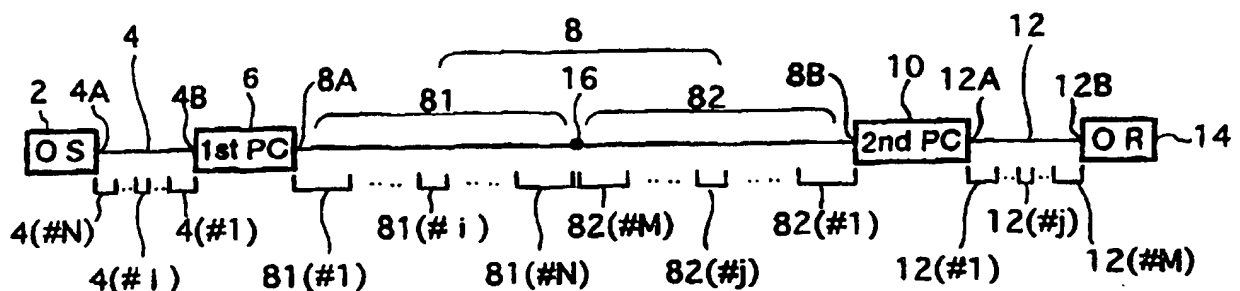


(51) 国際特許分類6 G02F 1/35, H04B 10/18	A1	(11) 国際公開番号 WO98/08138  (43) 国際公開日 1998年2月26日(26.02.98)
(21) 国際出願番号 PCT/JP97/02926  (22) 国際出願日 1997年8月22日(22.08.97)  (30) 優先権データ 特願平8/221274 1996年8月22日(22.08.96) JP  (71) 出願人 (米国を除くすべての指定国について) 富士通株式会社(FUJITSU LIMITED)[JP/JP] 〒211 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 Kanagawa, (JP) (72) 発明者; および (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ) 渡辺茂樹(WATANABE, Shigeki)[JP/JP] 〒211 神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番1号 富士通株式会社内 Kanagawa, (JP) (74) 代理人 弁理士 松本 昂(MATSUMOTO, Takashi) 〒107 東京都港区赤坂六丁目10番8号 ディーアイケイビル3階 松本国際特許事務所 Tokyo, (JP)		(81) 指定国 JP, US, 欧州特許 (DE, FR, GB, IT).  添付公開書類 国際調査報告書

(54)Title: OPTICAL FIBER COMMUNICATION SYSTEM USING OPTICAL PHASE CONJUGATE, APPARATUS APPLICABLE TO THE SYSTEM AND ITS MANUFACTURING METHOD

(54)発明の名称 光位相共役を用いた光ファイバ通信システム並びに該システムに適用可能な装置及びその製造方法



(57) Abstract

An optical fiber communication system which has, for instance, 1st and 2nd phase conjugators. The 1st phase conjugator converts a signal beam from a 1st optical fiber into a 1st phase conjugate beam, which is supplied to the 2nd phase conjugator through a 2nd optical fiber. The 2nd phase conjugator converts the 1st phase conjugate beam into a 2nd phase conjugate beam, which is transmitted through a 3rd optical fiber. The 2nd optical fiber consists of a 1st section between the 1st phase conjugator and the middle point of the system and a 2nd section between the middle point of the system and the 2nd phase conjugator. The total dispersion of the 1st optical fiber substantially agrees with the total dispersion of the 1st section, and the total dispersion of the 3rd optical fiber substantially agrees with the total dispersion of the 2nd section. With this constitution, the waveform distortion caused by the chromatic dispersion or nonlinearity is corrected.

本発明による光ファイバ通信システムは、例えば、第1及び第2の位相共役器を有している。第1の位相共役器は、第1の光ファイバからの信号ビームを第1の位相共役ビームに変換する。第1の位相共役ビームは第2の光ファイバにより第2の位相共役器に供給される。第2の位相共役器は第1の位相共役ビームを第2の位相共役ビームに変換する。第2の位相共役ビームは第3の光ファイバにより伝送される。第2の光ファイバは、第1の位相共役器及びシステム中間点の間の第1の部分と、システム中間点及び第2の位相共役器の間の第2の部分とからなる。第1の光ファイバの総分散は第1の部分の総分散と実質的に一致し、第2の部分の総分散は第3の光ファイバの総分散に実質的に一致する。これにより、波長分散或いは非線形性による波形歪みが補償される。

PCTに基づいて公開される国際出願のパンフレット第一頁に記載されたPCT加盟国を特定するために使用されるコード (参考情報)

AL アルバニア  
AM アルメニア  
AT オーストラリア  
AU オーストラリア  
AZ アゼルバイジャン  
BA ボスニア・エルツェゴビナ  
BB パルバドス  
BE ベルギー  
BF ブルキナ・ファソ  
BG ブルガリア  
BJ ベナン  
BR ブラジル  
BY ベラルーシ  
CA カナダ  
CF 中央アフリカ共和国  
CG コンゴ  
CH スイス  
CI コート・ジボアール  
CM カメルーン  
CN 中国  
CU キューバ  
CZ チェッコ共和国  
DE ドイツ

ES スペイン  
FI フィンランド  
FR フランス  
GA ガボン  
GB 英国  
GE グルジア  
GH ガーナ  
GM ガンビア  
GN ギニア  
GW ギニアビサウ  
GR ギリシャ  
HU ハンガリー  
ID インドネシア  
IE アイルランド  
IL イスラエル  
IS アイスランド  
IT イタリア  
JP 日本  
KE ケニア  
KG キルギスタン  
KP 朝鮮民主主義人民共和国  
KR 大韓民国  
KZ カザフスタン

LK スリランカ  
LR リベリア  
LS レソト  
LT リトアニア  
LU ルクセンブルグ  
LV ラトヴィア  
MC モナコ  
MD モルドヴァ共和国  
MG マダガスカル  
MK マケドニア共和国  
ML マリ  
MN モンゴル  
MR モリタニア  
MW モザンビーク  
MX メキシコ  
NE ニジェール  
NL オランダ  
NO ノルウェー  
NZ ニュージーランド  
PL ポーランド  
PT ポルトガル  
RO ルーマニア

SE スウェーデン  
SG シンガポール  
SI スロベニア共和国  
SK スロヴァキア共和国  
SL シェラレオネ  
SN セネガル  
SZ スワジランド  
TD チャード  
TG トーゴ  
TJ タジキスタン  
TM トルクメニスタン  
TR トルコ  
TT トリニダード・トバゴ  
UA ウクライナ  
UG ウガンダ  
US 米国  
UZ ウズベキスタン  
VN ヴイエトナム  
YU ユーゴスラビア  
ZW ジンバブエ

## 明 細 書

光位相共役を用いた光ファイバ通信システム  
並びに該システムに適用可能な装置及びその  
製造方法

5

### 技 術 分 野

本発明は光位相共役を用いた光ファイバ通信  
システム並びに該システムに適用可能な装置及  
びその製造方法に関する。

10

### 背 景 技 術

低損失なシリカ光ファイバが開発されたこと  
により、光ファイバを伝送路として用いる光フ  
ァイバ通信システムが数多く実用化されてきた。  
光ファイバそれ自体は極めて広い帯域を有して  
いる。しかしながら、光ファイバによる伝送容  
量は実際上はシステムデザインによって制限さ  
れる。最も重要な制限は、光ファイバにおいて  
生じる波長分散による波形歪みに起因する。光  
ファイバはまた例えば約  $0.2 \text{ dB/km}$  の割  
合で光信号を減衰させるが、この減衰による損  
失は、エルビウムドープファイバ増幅器 (E D  
F A) を始めとする光増幅器の採用によって補  
償されてきた。

15

20

25

しばしば単純に分散と称される波長分散は、  
光ファイバ内における光信号の群速度が光信号  
の波長（周波数）の関数として変化する現象で  
ある。例えば標準的なシングルモードファイバ  
5 においては、 $1.3\ \mu\text{m}$ よりも短い波長に対し  
ては、より長い波長を有する光信号がより短い  
波長を有する光信号よりも速く伝搬し、その結  
果としての分散は、通常、正常分散と称される。  
10  $1.3\ \mu\text{m}$ よりも長い波長に対しては、より短  
い波長を有する光信号がより長い波長を有する  
光信号よりも速く伝搬し、その結果としての分  
散は異常分散と称される。

近年、EDFAの採用による光信号パワーの  
増大に起因して、非線形性が注目されている。  
15 伝送容量を制限する光ファイバの最も重要な非  
線形性は光カー効果である。光カー効果は光フ  
ァイバの屈折率が光信号の強度に伴って変化す  
る現象である。屈折率の変化は光ファイバ中を  
伝搬する光信号の位相を変調し、その結果信号  
20 スペクトルを変更する周波数チャープニングが生  
じる。この現象は自己位相変調（self-phase  
modulation: SPM）と  
して知られている。SPMによってスペクトル  
が拡大され、波長分散による波形歪みが更に大  
25 きくなる。

このように、波長分散及びカー効果は、伝送距離の増大に伴って光信号に波形歪みを与える。従って、光ファイバによる長距離伝送を可能にするためには、波長分散及び非線形性は制御され、補償され或いは抑圧されることが必要である。

波長分散及び非線形性を制御する技術として、主信号のための電子回路を含む再生中継器を用いたものが知られている。伝送路の途中に例えば複数の再生中継器が配置され、各々の再生中継器では、光信号の波形歪みが過剰になる前に光／電気変換、再生処理及び電気／光変換がこの順で行われる。しかし、この方法では、高価で複雑な再生中継器が必要であるとともに、再生中継器が有する電子回路が主信号のビットレートを制限するという問題がある。

波長分散及び非線形性を補償する技術として、光ソリトンが知られている。与えられた異常分散の値に対して精度よく規定された振幅、パルス幅及びピークパワーを有する光信号パルスが発生させられ、それにより、光カー効果によるSPMと異常分散とに起因するパルス圧縮と、分散によるパルス拡がりとがバランスして、光ソリトンはその波形を維持したまま伝搬して行く。

波長分散及び非線形性を補償するための他の技術として、光位相共役の適用がある。例えば、伝送路の波長分散を補償するための方法がヤリ  
5      フらによって提案されている (A. Yariv, D. Fekete, and D. M. Pepper, Compensation for channel dispersion by nonlinear optical phase conjugation " Opt. Lett., vol. 4, pp. 52-54, 1979 )。伝送路の中間点で光信号が位相共役光に変換され、伝送路の前半で受け  
10      た波長分散による波形歪みが伝送路の後半の波長分散による歪みで補償される。

特に、2つの地点での電場の位相変化の要因が同じであり、その要因をもたらす環境変化が2地点の間の光の伝搬時間内で緩やかであると  
15      すれば、2地点の中間に位相共役器（位相共役光発生装置）を配置することによって、位相変化は補償される (S. Watanabe, "Compensation of phase fluctuation in a transmission line by optical conjugation" Opt. Lett., vol. 17, pp. 1355-1357, 1992)。従って、位  
20      相共役器の採用によって、SPMに起因する波形歪みも補償される。しかし、位相共役器の前後で光パワーの分布が非対象である場合には、非線形性の補償が不完全になる。

25      発明者は、先に、位相共役器を用いる場合に

光パワーの非対称性による補償の不完全さを克服するための技術を提案した (S. Watanabe and M. Shirasaki, "Exact compensation for both chromatic dispersion and Kerr effect in a transmission fiber using optical phase conjugation" J. Lightwave Technol., vol. 14, pp. 243-248, 1996)。位相共役器は伝送路におけるその前後の分散値又は非線形効果の総量が等しくなる点の近傍に配置され、その前後における種々のパラメータが微小区間毎に設定される。しかし、位相共役器が伝送路の途中に配置されるので、例えば伝送路を大陸間に敷設する場合に、位相共役器は海底に沈めなければならないかもしれない。この場合、位相共役器の保守が困難になる。伝送路のうち前半部分或いは後半部分を送信端局又は受信端局内に配置し、伝送路の残りの半分を大陸間に敷設することが提案され得る。この場合、位相共役器は送信端局又は受信端局内に設けることができるので、その保守は容易である。しかし、この場合には、伝送路の前半部分と後半部分とでパラメータの設定に偏りが生じ、補償が不完全になるかもしれない。

本発明の目的は、2つ又はそれより多い位相共役器を用いることにより波長分散及び非線形

性を効果的に補償することができる光ファイバ通信システムを提供することにある。

5 本発明の他の目的は、波長分散及び非線形性を補償するために位相共役器を伝送路の途中に配置する必要のない光ファイバ通信システムを提供することにある。

本発明の更に他の目的は以下の説明から明らかになる。

#### 10 発 明 の 開 示

本発明によると、第1及び第2の位相共役器を有する光ファイバ通信システムが提供される。第1の位相共役器には第1の光ファイバにより信号ビームが供給される。第1の位相共役器は、  
15 信号ビームを第1の位相共役ビームに変換して出力する。第1の位相共役ビームは第2の光ファイバにより第2の位相共役器に供給される。第2の位相共役器は第1の位相共役ビームを第2の位相共役ビームに変換して出力する。第2  
20 の位相共役ビームは第3の光ファイバにより伝送される。第2の光ファイバの途中にシステム中間点が設定される。即ち、第2の光ファイバは、第1の位相共役器及びシステム中間点の間の第1の部分と、システム中間点及び第2の位  
25 相共役器の間の第2の部分とからなる。第1の



光ファイバの総分散（波長分散の平均値及び長さの積）は第１の部分の総分散と実質的に一致し、第２の部分の総分散は第３の光ファイバの総分散に実質的に一致する。各パラメータの具体的な設計例は後述する。

このようなパラメータの設定によって波長分散及び非線形性が効果的に補償される。また、２つの位相共役器を用いてシステム中間点で波形歪みが最も小さくなるようにしたので、位相共役器を伝送路の途中に配置する必要がない。本発明によると、光カー効果だけでなく、ラマン効果等の他の非線形性も補償される。

望ましくは、第１、第２及び第３の光ファイバを含む光路上には複数の光増幅器が設けられ、これにより長距離の伝送が可能になる。各光増幅器で発生するノイズが累積したとしても、本発明ではシステム中間点で光信号の波形が一旦元に戻っているので、システム中間点の近傍において光帯域通過フィルタにより有効にノイズを除去することができる。即ち、本発明では、システム中間点において信号スペクトルが元のようになくなっているため、ノイズを除去するための狭い通過帯域を有する光帯域通過フィルタの使用が可能になるのである。

図面の簡単な説明

図 1 は本発明の光ファイバ通信システムの基本構成を示すブロック図；

図 2 は図 1 のシステムにおける補償の原理の説明図；

5 図 3 は実証実験で用いたシステムのブロック図；

図 4 は B E R（ビットエラーレート）特性を示す図；

10 図 5 A 乃至 5 E は図 3 のシステムにおける波形の変化を説明するための図；

図 6 は本発明に適用可能な位相共役器の構成例を示すブロック図；

15 図 7 は本発明の光通信システムの第 1 実施形態を示すブロック図；

図 8 は図 7 のシステムにおける光パワー等のダイアグラムを示す図；

図 9 は本発明に適用可能な光増幅器のブロック図；

20 図 1 0 は本発明の光通信システムの第 2 実施形態を示すブロック図；

図 1 1 は本発明の光通信システムの第 3 実施形態を示すブロック図；

25 図 1 2 は本発明の光通信システムの第 4 実施形態を示すブロック図；

図 1 3 はファイバグレーティングを用いた分散補償器を示す図；

図 1 4 は本発明の光通信システムの第 5 実施形態を示すブロック図；

5 図 1 5 は本発明の光通信システムの第 6 実施形態を示すブロック図；

図 1 6 は本発明の光通信システムの第 7 実施形態を示すブロック図；

10 図 1 7 A 及び 1 7 B は図 1 6 のシステムにおける分散パラメータの設計例を示す図；

図 1 8 A 及び 1 8 B は本発明が適用可能な光ネットワークの例を示す図；

図 1 9 は本発明の光ファイバ通信システムの他の基本構成を示すブロック図；

15 図 2 0 は本発明による非線形光学媒質の製造プロセスの実施形態を示す図；

図 2 1 は本発明に適用可能な他の位相共役光発生器の構成例を示す図；

20 図 2 2 は広い変換帯域を有する位相共役器による WDM（波長分割多重）信号光の一括変換を説明するための図；

図 2 3 は波長変換及び位相共役変換が適用されるシステムの実施形態を示す図；

25 図 2 4 は図 2 3 における波長帯の設定例を示す図；

図 2 5 は図 2 3 における波長帯の他の設定例を示す図；

図 2 6 は図 2 3 における分散配置の例を示す図；

5 図 2 7 は図 6 に示される位相共役器の改良例を示すブロック図；

図 2 8 A は図 2 7 に示される光フィルタ 1 5 2, 1 5 4 及び 1 5 6 の特性を示す図；そして

10 図 2 8 B ~ 2 8 D は図 2 7 に示される位相共役器の各位置において観測されるスペクトルを示す図である。

#### 発明を実施するための最良の態様

15 以下、添付図面を参照して本発明の望ましい実施の形態を詳細に説明する。

図 1 を参照すると、本発明の光ファイバ通信システムの基本構成が示されている。光送信機 ( O S ) 2 は信号ビームを出力する。第 1 の光ファイバ 4 は、信号ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第 1 端 4 A 及び第 2 端 4 B を有している。第 2 端 4 B には第 1 の位相共役器 ( 1 s t P C ) 6 が動作的に接続されている。

25 この出願において、ある要素と他の要素とが動作的に接続されるというのは、これらの要素

が直接接続される場合を含み、更に、これらの要素の間で光信号（又は電気信号）の受渡しができる程度の関連性をもってこれらの要素が設けられている場合を含む。

5       第1の位相共役器6は、第1の光ファイバ4から供給された信号ビームを第1の位相共役ビームに変換して出力する。第2の光ファイバ8は、第1の位相共役ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第3端8A及び第4端8Bを有している。第4端8Bには第2の位相共役器（2nd PC）10が動作的に接続される。  
10       第2の位相共役器10は、第2の光ファイバ8から供給された第1の位相共役ビームを第2の位相共役ビームに変換して出力する。第3の光ファイバ12は、第2の位相共役ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第5端12A及び第6端12Bを有している。第3の光ファイバ12によって伝送された第2の位相共役ビームを受けるために、光受信機（OR）14が  
15       設けられている。  
20

      第2の光ファイバ8の途中にはシステム中間点16が設定される。システム中間点16は、例えば、波形歪みが最も小さくなる点として定義され、その具体的な位置については後述する。  
25       第2の光ファイバ8は、第3端8A及びシステ

ム中間点 1 6 の間の第 1 の部分 8 1 と、システム中間点 1 6 及び第 4 端 8 B の間の第 2 の部分 8 2 とからなる。

5      光ファイバ 4 , 8 及び 1 2 における各パラメータは、例えば次のようにして設定される。

まず、第 1 の光ファイバ 4 が N 個 ( N は 1 より大きい整数 ) の区間 4 ( # 1 , ... , # N ) に仮想的に分割され、第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 も同じ数の区間 8 1 ( # 1 , ... , # N ) に仮想的に分割される。このとき、第 1 の  
10      位相共役器 6 から数えて対応する 2 つの区間の波長分散の平均値及び区間長の積が実質的に一致するようにされる。即ち、第 1 の光ファイバ 4 において第 1 の位相共役器 6 から数えて i  
15      (  $1 \leq i \leq N$  ) 番目の区間 4 ( # i ) の波長分散 ( 又は分散パラメータ ) の平均値及び区間長をそれぞれ  $D_{1i}$  及び  $L_{1i}$  とし、第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 において第 1 の位相共役器 6 から数えて i 番目の区間 8 1 ( # i ) の波  
20      長分散 ( 又は分散パラメータ ) の平均値及び区間長をそれぞれ  $D_{2i}$  及び  $L_{2i}$  とするときに、

$$D_{1i} L_{1i} = D_{2i} L_{2i} \quad \dots \quad (1)$$

25      が満足される。更に、区間 4 ( # i ) における

光パワーの平均値及び非線形係数の平均値をそれぞれ  $P_{1,i}$  及び  $\gamma_{1,i}$  とし、区間 8 1 ( $\# i$ ) における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値をそれぞれ  $P_{2,i}$  及び  $\gamma_{2,i}$  とするときに、

$$P_{1,i} \gamma_{1,i} L_{1,i} = P_{2,i} \gamma_{2,i} L_{2,i} \quad \dots \quad (2)$$

が満足される。

一方、第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 が  $M$  個 ( $M$  は 1 より大きい整数) の区間 8 2 ( $\# 1, \dots, \# M$ ) に仮想的に分割され、第 3 の光ファイバ 1 2 も同じ数の区間 1 2 ( $\# 1, \dots, \# M$ ) に仮想的に分割される。このとき、第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 において第 2 の位相共役器 1 0 から数えて  $j$  ( $1 \leq j \leq M$ ) 番目の区間 8 2 ( $\# j$ ) の波長分散の平均値及び区間長をそれぞれ  $D_{3,j}$  及び  $L_{3,j}$  とし、第 3 の光ファイバ 1 2 において第 2 の位相共役器 1 0 から数えて  $j$  番目の区間 1 2 ( $\# j$ ) の波長分散の平均値及び区間長をそれぞれ  $D_{4,j}$  及び  $L_{4,j}$  とするときに、

$$D_{3,j} L_{3,j} = D_{4,j} L_{4,j} \quad \dots \quad (3)$$

が満足される。更に、区間 8 2 ( $\# j$ ) におけ

る光パワーの平均値及び非線形係数の平均値をそれぞれ  $P_{3j}$  及び  $\gamma_{3j}$  とし、区間 1 2 ( # j ) における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値をそれぞれ  $P_{4j}$  及び  $\gamma_{4j}$  とするときに、

5

$$P_{3j}, \gamma_{3j}, L_{3j} = P_{4j}, \gamma_{4j}, L_{4j} \quad \dots \quad (4)$$

が満足される。

10

図 1 のシステムにおいては、第 1 の位相共役器 6 の前後で波形歪みは一旦大きくなるが、

( 1 ) 式及び ( 2 ) 式の条件により、システム中間点 1 6 において波長分散及び非線形性が補償され、波形は一旦元の状態に戻る。この回復した波形は再び第 2 の位相共役器 1 0 の前後で歪むが、 ( 3 ) 式及び ( 4 ) 式の条件により光受信機 1 4 においては波長分散及び非線形性が補償された結果、波形は再び元に戻る。

15

また、本発明のシステムは、海底等に敷設される可能性のある第 2 の光ファイバ 8 についての長さ等のパラメータの設定誤差に対して寛容である。即ち、システム中間点 1 6 において例えば波形が完全に元の状態に戻らないとしても、この不完全性を第 2 の部分 8 2、第 2 の位相共役器 1 0 及び第 3 の光ファイバ 1 2 で再現することによって、光受信機 1 4 において波形を実

20

25



質的に完全に元に戻すことができるのである。

図2を参照すると、波長分散及び非線形性の補償の原理が示されている。ここでは、光送信機2からシステム中間点16に至るまでの補償の原理が説明される。まず、図2の説明に先立ち、位相共役波の一般的事項について説明する。

光ファイバ伝送における光信号  $E(x, y, z, t) = F(x, y) \phi(z, t) \exp[i(\omega t - k z)]$  の伝搬は、一般に以下の非線形波動方程式によって記述可能である。ここに、 $F(x, y)$  は横方向のモード分布、 $\phi(z, t)$  は光の複素包絡線を表し、この  $\phi(z, t)$  は光の周波数  $\omega$  に比べて十分にゆっくり変化すると仮定する。

$$i \frac{\partial \phi}{\partial z} - \left(\frac{1}{2}\right) \beta_2 \frac{\partial^2 \phi}{\partial T^2} + \gamma |\phi|^2 \phi = - \left(i/2\right) \alpha \phi \quad \dots (5)$$

ここに、 $T = t - \beta_1 z$  ( $\beta_1$  は伝搬定数)、 $\alpha$  はファイバの損失、 $\beta_2$  はファイバの波長分散を表し、

$$\gamma = \frac{\omega n_2}{c A_{eff}} \quad \dots (6)$$

は、3次の非線形係数(光カー効果の係数)を表す。ここに、 $n_2$  と  $A_{eff}$  はそれぞれファイ

バの非線形屈折率と有効コア断面積を表す。c  
 は真空中の光速である。ここでは1次分散まで  
 を考慮し、それより高次の分散は省略した。ま  
 た、 $\alpha$ 、 $\beta_2$ 、 $\gamma$ はzの関数であるとし、それ  
 ぞれ $\alpha(z)$ 、 $\beta_2(z)$ 、 $\gamma(z)$ と表され  
 るものとする。さらに、位相共役器の位置を原  
 点( $z=0$ )とする。ここで、以下の規格化関  
 数を導入する。

$$\phi(z, T) = A(z) u(z, T) \quad \dots (7)$$

ここに、

$$\begin{aligned}
 A(z) &\equiv \\
 A(0) \exp \left[ - \left( \frac{1}{2} \right) \int_0^z \alpha(z) dz \right] &\dots (8)
 \end{aligned}$$

は、振幅を表し、 $\alpha(z) > 0$ の場合は伝送路  
 が損失を持ち、 $\alpha(z) < 0$ の場合は利得を持  
 つことをそれぞれ表す。 $A(z) \equiv A(0)$ は  
 損失無しの場合を表す。また、 $A(z)^2 = P$   
 $(z)$ は光パワーに相当する。(7)、(8)  
 式を(5)式に代入すると、次の発展方程式が  
 得られる。

$$i \frac{\partial u}{\partial z} = \left(\frac{1}{2}\right) \beta_2(z) \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \gamma(z) A(z) |u|^2 u \quad \dots (9)$$

5      ここで以下の変換を行う。

$$\zeta = \int_0^z |\beta_2(z)| dz \quad \dots (10)$$

その結果、(9)式は以下のように変換できる。

$$10 \quad i \frac{\partial u}{\partial \zeta} = \frac{\text{sgn}[\beta_2]}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial T^2} - \frac{\gamma(\zeta) A(\zeta)^2}{|\beta_2(\zeta)|} |u|^2 u \quad \dots (11)$$

15      ここで、 $\text{sgn}[\beta_2] \equiv \pm 1$  は、 $\beta_2 > 0$  ,  
即ち正常分散の場合には +1 を、 $\beta_2 < 0$  , 即  
ち異常分散の場合には -1 をそれぞれとる。  
(11)式が成り立てばその複素共役も成り立  
ち、次の式が得られる。

$$20 \quad -i \frac{\partial u^*}{\partial \zeta} = \frac{\text{sgn}[\beta_2]}{2} \frac{\partial^2 u^*}{\partial T^2} - \frac{\gamma(\zeta) A(\zeta)^2}{|\beta_2(\zeta)|} |u^*|^2 u^* \quad \dots (12)$$

複素共役光  $u^*$  は  $u$  に対する発展方程式と同じ発展方程式に従う。ただし、その際の伝搬方向は反転する。この動作はまさしく位相共役器の動作である。特に透過型の位相共役器においては上記のことは波長分散と SPM とによる位相シフトを反転させることと等価である。

ここで、図 2 においては、第 1 の光ファイバ 4 の長さは  $L_1$  であり、第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8-1 の長さは  $L_2$  であるとする。また、位相共役器 6 は  $z$  座標及び  $\xi$  座標の原点  $z = 0$  ( $\xi = 0$ ) に配置される。システム中間点 1-6 の  $z$  座標及び  $\xi$  座標はそれぞれ  $L_2$  及び  $\xi_0$  である。

第 1 の光ファイバ 4 においては、信号ビーム  $u(E_s)$  は発展方程式 (1-1) に従って伝搬する。位相共役器 6 により信号ビーム  $u$  は位相共役ビーム  $u^*(E_c)$  に変換される。位相共役ビーム  $u^*$  は第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8-1 において発展方程式 (1-2) 式に従って伝搬する。このとき  $\xi$  軸上の位相共役器 6 の位置 ( $\xi = 0$ ) に関して対称な位置にある任意の 2 点  $-\xi$ ,  $\xi$  における規格化距離  $d$  と内において、(1-1) 式の右辺第一、二項の係数が等しくなるように各パラメータの値を設定すれば、 $-\xi$  における  $u^*$  は  $\xi$  における  $u$  の位相共役波

となる。即ち、次の2式が条件となる。

$$\text{sgn} [\beta_2 (-\zeta)] = \text{sgn} [\beta_2 (\zeta)] \quad \dots (13)$$

5

$$\frac{\gamma (-\zeta) A (-\zeta)^2}{|\beta_2 (-\zeta)|} = \frac{\gamma (\zeta) A (\zeta)^2}{|\beta_2 (\zeta)|} \quad \dots (14)$$

10

(13)式は第1の光ファイバ4及び第1の部分81の分散の符号が等しい必要性を示している。ファイバ内では、 $\gamma > 0$ 、 $A(z)^2 > 0$ であることを考慮すると、上記条件は次のようにまとめることができる。

15

$$\frac{\gamma (-\zeta) A (-\zeta)^2}{\beta_2 (-\zeta)} = \frac{\gamma (\zeta) A (\zeta)^2}{\beta_2 (\zeta)} \quad \dots (15)$$

20

第1の光ファイバ4内の $(-\zeta)$ における波長分散とSPMとによる位相シフトは位相共役器6により符号が反転する。従って、この位相シフトによる波形歪みは第1の部分81内の

25

$(\zeta)$ における位相シフトによる歪みにより補償される。このように区間毎に上記のような設

定による補償を繰り返していけば、全長に渡る補償が可能となる。

次に、上記の補償条件を  $z$  座標で記述する。

(15) 式より、

5

$$\frac{\gamma(-z_1) A(-z_1)^2}{\beta_2(-z_1)} = \frac{\gamma(z_2) A(z_2)^2}{\beta_2(z_2)} \quad \dots (16)$$

10

を得る。即ち、各区間内での非線形係数と光パワーの積に対する波長分散の比を等しくすることが条件となる。ここで、 $-z_1$ ,  $z_2$  は次の式を満足させる2点である。

15

$$\int_0^{-z_1} |\beta_2(z)| dz = - \int_0^{z_2} |\beta_2(z)| dz \quad \dots (17)$$

(16), (17) 式より (18), (19) 式が得られる。

20

$$\beta_2(-z_1) dz_1 = \beta_2(z_2) dz_2 \quad \dots (18)$$

$$\begin{aligned} \gamma(-z_1) A(-z_1)^2 dz_1 \\ = \gamma(z_2) A(z_2)^2 dz_2 \quad \dots (19) \end{aligned}$$

25

5  $dz_1, dz_2$  はそれぞれ  $-z_1, z_2$  における小区間の長さであり、各区間長は当該区間内の分散に反比例するかあるいは非線形係数と光パワーの積に反比例する。ここで、分散  $\beta_2$  と分散パラメータ  $D$  の関係、 $D = -(2\pi c / \lambda^2) \beta_2$  を考慮すれば、(18), (19) 式より以下の関係が得られる。 $D$  は  $z$  の関数であり、 $D(z)$  とも表される。

$$10 \quad D(-z_1) dz_1 = D(z_2) dz_2 \quad \dots (20)$$

$$\begin{aligned} \gamma(-z_1) P(-z_1) dz_1 \\ = \gamma(z_2) P(z_2) dz_2 \quad \dots (21) \end{aligned}$$

15 分散及び非線形性について何れも位相共役器 6 に関して対称な二つの位置の一方における増加分と他方における減少分とが等しいことが補償の条件であることがわかる。

20 (20), (21) 式は、補償のための必要条件であり、対応する 2 つの区間で総分散量とカー効果の総量とが等しくなることを示している。即ち、(1) 式乃至 (4) 式の条件の有効性が確認された。

25 特に  $\alpha, D$  及び  $\gamma$  が実質的に一定であり且つパワーの変動が小さい場合には (20), (2

1) 式を積分すれば、

$$D_1 L_1 = D_2 L_2 \quad \dots (22)$$

$$\gamma_1 \bar{P}_1 L_1 = \gamma_2 \bar{P}_2 L_2 \quad \dots (23)$$

5

を得る。ここで、 $\bar{P}_1$ 、 $\bar{P}_2$  はそれぞれ第 1 の光ファイバ 4 及び第 1 の部分 8 1 における平均パワーである。また、 $D_1$ 、 $\gamma_1$  はそれぞれ第 1 の光ファイバ 4 の分散パラメータ及び非線形  
10 係数又はそれらの平均値、 $D_2$ 、 $\gamma_2$  はそれぞれ第 1 の部分 8 1 の分散パラメータ及び非線形係数又はそれらの平均値である。(22)、

(23) 式は分散補償及び平均値近似による SPM の補償法における条件と一致する。

15

実用的には、(22) 式の条件を満足するだけでも本発明を実施することができる。例えば、図 1 のシステムにおいて、第 1 の光ファイバ 4 の波長分散の平均値及び長さの積が第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 の波長分散の平均値  
20 及び長さの積に実質的に一致するようにし、且つ、第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 の波長分散の平均値及び長さの積が第 3 の光ファイバ 1 2 の波長分散の平均値及び長さの積に実質的に一致するようにするのである。この設定に

25



より、波長分散による波形歪みが補償される。

望ましくは、更に (2 3) 式の条件を満足するために、第 1 の光ファイバ 4 における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに第 1 の光ファイバ 4 の長さの積が第 1 の部分 8 1 における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに第 1 の部分 8 1 の長さの積に実質的に一致するようにし、第 2 の部分 8 2 における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに第 2 の部分 8 2 の長さの積が第 3 の光ファイバ 1 2 における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに第 3 の光ファイバ 1 2 の長さの積に実質的に一致するようにする。この設定により、波長分散による波形歪みに加えて非線形性による波形歪みも補償される。

第 1、第 2 及び第 3 の光ファイバ 4、8 及び 1 2 を含む光路上に複数の光増幅器が設けられている場合には、これらのうちの隣り合う各 2 つの光増幅器の間隔を光路（光ファイバ）の非線形長よりも短く設定するのが望ましい。非線形長については後述する。

図 2 においては、システム中間点 1 6 の上流側における補償の原理が示されている。システム中間点 1 6 の下流側における補償の原理はこれと同じようにして理解することができるので

その説明を省略する。

図 2 による説明においては、(10) 式に示されるように、位相共役器 6 からの波長分散の累積値によって規格化座標が定義されている。その結果、要求される条件は、(15) 式により示されているように、位相共役器 6 からの波長分散の累積値が等しい第 1 の光ファイバ 4 及び第 1 の部分 8 1 上の 2 点の各々における光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致することである。

図 2 においては、位相共役器 6 からの非線形効果の累積値（即ち光パワー及び非線形係数の積の累積値）によって規格化座標が定義されてもよい。この場合には、位相共役器 6 からの当該累積値が等しい第 1 の光ファイバ 4 及び第 1 の部分 8 1 上の 2 点の各々における波長分散と光パワー及び非線形係数の積との比が実質的に一致することが条件となる。

次に、図 2 の原理の有効性を実証するための実験の結果について説明する。

図 3 を参照すると、実証実験で用いられたシステムのブロック図が示されている。

送信機 (Transmitter) は図 1 の光送信機 2 に対応し、ファイバ補償器 (Fiber compensator) は図 1 の第 1

の光ファイバ 4 に対応し、位相共役器 ( P h a  
s e c o n j u g a t o r ) は図 1 の第 1 の  
位相共役器 6 に対応し、分散シフトファイバ  
( D S F - 1 , 2 , . . . , 4 6 ) 及びエルビ  
ウムドープファイバ増幅器 ( E D F A 1 , 2 ,  
. . . , 4 5 ) は図 1 の第 2 の光ファイバ 8 の  
第 1 の部分 8 1 に対応する。伝送特性を測定す  
るための受信機 ( R e c e i v e r ) は図 1 の  
システム中間点 1 6 に設けられた。

送信機における光源としては、3 電極  $\lambda / 4$   
シフト型の D F B - L D ( 分布帰還型レーザダイ  
オード ) が二つ用いられた。時分割多重され  
た  $20 \text{ G b} / \text{s}$  の信号光  $E_s$  ( 波長  $\lambda_s = 1551 \text{ nm}$  ) が、約  $40 \text{ ps}$  のパルス幅 ( F W H  
M ) を有する  $10 \text{ G b} / \text{s}$  の 2 チャンネルの R Z  
信号を時分割多重することによって生成された。  
 $10 \text{ G b} / \text{s}$  の R Z パルスを生成するために、  
第 1 の L i N b O<sub>3</sub> 変調器 ( L N - 1 ) を用い  
て  $10 - \text{GHz}$  の正弦波により  $E_s$  を強度変調  
し、次いで第 2 の L i N b O<sub>3</sub> 変調器 ( L N -  
2 ) を用いて  $10 \text{ G b} / \text{s}$  の N R Z データ信号  
( P N :  $2^{23} - 1$  ) によって強度変調を行った。  
変調された  $E_s$  はパワー  $P_1$  で二段の D D - D  
C F 1 , 2 に入力され、これにより波形が予め  
補償された。

ここで、「DD-DCF」は分散漸減型の分散補償ファイバ (dispersion-decreasing dispersion-compensating fiber: DD-DCF) を表している。

DD-DCFの各々は5本のDCF (DCF-a, b, c, d, e) を互いにスプライスして構成される。DD-DCFの各々の損失は0.46 dB/kmであり、DCFの各々のモードフィールド径は約4  $\mu$ mに設定された。

(16) 式の条件を近似的に満足するために、分散パラメータ $D_1$ はDD-DCFの各々における平均光パワーの減少に従って減少すべきである。そのために、5本のDCFの各々の長さ及び $D_1$ は、表に示されるように設定された。

表

DCF	長さ (km)	$D_1$ (ps/nm/km)
a	2.8	-80.6
b	2.7	-57.9
c	2.8	-43.7
d	2.7	-32.1
e	2.7	-27.0

DD-DCFの各々の長さは13.7 kmであ

り、各々の総分散は  $-662.8 \text{ ps/nm}$  であった。

尚、DD-DCFの各々に入力する光のパワーを  $P_1$  に設定するために、二つの光増幅器がカスケード接続された。

次いで、位相共役器が、 $20 \text{ km}$ のDSFにおける波長  $\lambda_p = 1554 \text{ nm}$ のポンプ光  $E_p$ を用いた非縮退型のフォワードFWM（四光波混合）によって、予め補償された（歪を与えられた） $E_s$ をこれと同方向に伝搬する位相共役光  $E_c$ （波長  $\lambda_c = 1557 \text{ nm}$ ）に変換した。 $E_s$ から  $E_c$ への変換効率は  $-12 \text{ dB}$ であった。

次いで、位相共役光  $E_c$ は、カスケード接続された46本のDSF（ $0.21 \text{ dB/km}$ 損失）及びこれらの間に設けられる45個のEDFA（各々の雑音指数は約  $6 \text{ dB}$ ）からなる  $3036 \text{ km}$ の伝送路へ供給された。この伝送路の  $\lambda_c$ における平均分散は  $-0.44 \text{ ps/nm/km}$ であった。従って、二段のDD-DCFにおける総分散と上記伝送路における総分散との間の差は約  $10 \text{ ps/m}$ であった。各DSFの長さは  $66 \text{ km}$ であり、各DSFへの光入力パワー  $P_2$ は  $+6 \text{ dBm}$ に設定された。

$P_1$ の最適値は上述の条件では  $+16 \text{ dBm}$

であった。DD-DCFの非線形係数 $\gamma_1$ は約  
18.0 W<sup>-1</sup>km<sup>-1</sup>であると見積もられた。

5 誘導ブリュアン散乱(SBS)を抑圧するた  
めに、 $E_s$ 及び $E_p$ はそれぞれ500-kHz  
及び150-kHzの正弦波信号により周波数  
変調された。受信機では、第3のLiNbO<sub>3</sub>  
変調器(LN-3)及びフェイズロックループ  
(PLL)を用いることによって $E_c$ は時分割  
デマルチプレキシングされ、ビットエラーレ  
10 ト(BER)が測定された。

比較のため、一つのDD-DCF及び23本  
のDSFを用いた1518kmの伝送実験も行  
われた。

図4に測定されたBERの特性を示す。30  
15 36kmの伝送の後であっても、 $10^{-9}$ より小  
さいBERで信号の検出を行うことができた。  
 $10^{-9}$ のBERにおける4.8dBのパワーペ  
ナルティは、EDFAの雑音等の理論値からの  
S/N劣化によるものであった。この実験では  
20  $\lambda_c$ は各EDFAにおけるゲインピークを与え  
る波長 $\lambda_c = 1558.5$ nmから1.5nm  
ほど離調していた。もし $\lambda_c$ を $\lambda_c$ に一致させ  
ることができれば、より高いS/N特性を得る  
ことができる。1518kmの伝送実験では、  
25 ペナルティは約1.2dBであった。

図 5 A ~ 5 E に 3 0 3 6 k m 伝送実験における検出された波形の変化の様子を示す。図 5 A は送信機の出力波形、図 5 B は位相共役器の出力波形、図 5 C は 1 5 1 8 k m 伝送後の波形、  
5 図 5 D は 2 7 0 6 k m 伝送後の波形、図 5 E は 3 0 3 6 k m 伝送後の波形をそれぞれ示している。予めひずめられた波形が E<sub>c</sub> の伝搬に伴って次第に改善されていることが判る。図 5 E における波形歪みの残留は、不完全な補償条件によるものであった。即ち、この実証実験では、  
10 E D F A の間隔 ( D S F の長さ ; 6 6 k m ) が非線形係数と光パワーの積の逆数で定義される非線形長よりも十分に短くないことにより、波形の改善が完全でなかったものである。

15 従って、本発明では、光増幅器を複数用いる場合には、これらの間隔を非線形長よりも短く設定することが望ましい。

また、D D - D C F における D C F の分割数を実験における 5 よりも大きくすることによって、補償を更に改善することができる。  
20

図 1 の光ファイバ 4 , 8 及び 1 2 の各々としてはシングルモードのシリカファイバを用いることができる。光ファイバ通信において用いられるシリカファイバとしては、1 . 3 μ m 零分散ファイバや 1 . 5 5 μ m 分散シフトファイバ  
25

等がある。

光送信機 2 における信号光の変調方式としては、光振幅（強度）変調、周波数変調、位相変調その他の実施可能なあらゆる変調方式が挙げられる。また、光受信機 1 4 における信号検出は、光帯域フィルタによるフィルタリングの後での光直接検波、或いは光ヘテロダイン検波により行うことができる。

位相共役器 6 及び 1 0 の各々は、2 次又は 3 次の非線形光学媒質と、この媒質をポンピングする手段とを有する。2 次の非線形光学媒質が用いられている場合には、パラメトリック効果により位相共役変換が行われ、また、3 次の非線形光学媒質が用いられている場合には、縮退型或いは非縮退型の四光波混合により位相共役変換が行われる。

3 次の非線形光学媒質としては例えばシリカファイバを用いることができ、この場合、四光波混合におけるポンプ光の波長をそのシリカファイバの零分散波長にほぼ一致させておくことにより、良好な位相共役変換がなされる。シリカファイバを用いた位相共役器は、高速性、広帯域性、低歪み性、及び伝送路との整合性において優れている。

3 次の非線形光学媒質として、半導体光増幅



器 (S O A) を用いることもできる。S O A を用いた位相共役器は広帯域性及び小型化の面で優れている。

5        3 次の非線形光学媒質として分布帰還型レーザダイオード (D F B - L D) それ自身を用いることもできる。電流注入によって D F B - L D がポンプ光を生成し、四光波混合によって位相共役変換が行われる。従って、外部のポンプ光源が不要である。D F B - L D を用いた位相  
10        共役器は広帯域性及び小型化の面で優れている。D F B - L D を用いた位相共役器の詳細については、文献 (H. Kuwatsuka, H. Shoji, M. Matsuda and H. Ishikawa, "THz frequency conversion using nondegenerate four-wave mixing process in a lasing long-cavity  $\lambda/4$ -shifted DFB laser" Electron. Lett., vol. 31, pp. 2108-2110, 1995) を参照されたい。

20        2 次の非線形光学媒質としては L i N b O<sub>3</sub> や A l G a A s 等からなる光導波路を用いることができる。この光導波路を用いた位相共役器は、疑似位相整合構造の採用により良好な位相整合を可能にすると共に、広帯域性において優れており、また位相共役ビームの抽出が容易である。これに関しては、例えば、文献 (C. Q. Xu, H. Okayama and M. Kawahara, "1.5  $\mu$ m band  
25

efficient broadband wavelength conversion  
by difference frequency generation in a  
periodically domain-inverted LiNbO<sub>3</sub> channel  
waveguide " Appl. Phys. Lett., vol. 63,

5 No. 26, pp. 3559-3561, 1993)を参照されたい。

図 6 を参照すると、図 1 の位相共役器 6 及び  
1 0 の各々として用いることができる位相共役  
器が示されている。この位相共役器は、3 次の  
非線形光学媒質としての光ファイバ 1 8 と、ポ  
ンプ光源としてのレーザダイオード (L D) 2  
10 0 と、入力ビーム及びポンプ光を加え合わせて  
光ファイバ 1 8 に供給するための光カップラ 2 2  
とを備えている。

光ファイバ 1 8 は望ましくはシングルモード  
ファイバである。この場合において、入力ビー  
ムの波長とポンプ光の波長をわずかに異ならせ  
て非縮退型の四光波混合を生じさせるときには、  
光ファイバ 1 8 の零分散波長がポンプ光の波長  
(L D 2 0 の発振波長) に一致するようにして  
15 おく。光カップラ 2 2 は 4 つのポート 2 2 A, 2  
2 B, 2 2 C 及び 2 2 D を有している。ポート  
2 2 A には入力ビーム (信号ビーム又は第 1 の  
位相共役ビーム) が供給され、ポート 2 2 B は  
L D 2 0 に接続され、ポート 2 2 C は光ファイ  
20 バ 1 8 の第 1 端に接続され、ポート 2 2 D はデ

ッドエンドにされている。光ファイバ 1 8 の第 2 端はこの位相共役器の出力ポートとなる。光カプラ 2 2 は、ポート 2 2 A 及び 2 2 B にそれぞれ供給された入力ビーム及びポンプ光をポート 2 2 C から出力する。光カプラ 2 2 としては、例えば、ファイバ融着型のもの、ハーフミラー、光合波器、変更ビームスプリッタ等が使用される。

図 7 を参照すると、本発明の第 1 実施形態が示されている。第 1 の光ファイバ 4 としては、実証実験で用いられたような 2 つの D D - D C F 2 4 が採用されている。各 D D - D C F 2 4 の入力側には光増幅器 2 6 が設けられており、これにより各 D D - D C F 2 4 に供給される信号ビームのパワーが予め定められたレベルになるようにされている。第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 は複数の光ファイバ 2 8 をカスケード接続して構成される。各光ファイバ 2 8 の間には、第 1 の部分 8 1 における光パワーをほぼ一定に保つために、光増幅器 3 0 が設けられている。第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 は複数の光ファイバ 3 2 から構成される。各光ファイバ 3 2 の間には、第 2 の部分 8 2 における光パワーをほぼ一定に保つために、光増幅器 3 4 が設けられている。

特にこの実施形態では、システム中間点 1 6  
には、ノイズの除去が効果的に行われる光増幅  
器 3 6 が設けられてる。第 3 の光ファイバ 1 2  
としては、実証実験で用いられたのと同じよう  
な 2 つの D D - D C F 3 8 が採用されている。  
各 D D - D C F 3 8 の入力側には、各 D D - D  
C F 3 8 に供給される第 2 の位相共役ビームの  
パワーが予め定められたレベルになるようにす  
るために、光増幅器 4 0 が設けられている。

光送信機 2、第 1 の光ファイバ 4 及び第 1 の  
位相共役器 6 は第 1 の端局 4 2 に含まれ、第 2  
の位相共役器 1 0、第 3 の光ファイバ 1 2 及び  
光受信機 1 4 は第 2 の端局 4 4 に含まれる。端  
局 4 2 及び 4 4 は例えばそれぞれ別の大陸に設  
置され、この場合、これら的大陸間の海底に第  
2 の光ファイバ 8 を伝送路として敷設すること  
ができる。

図 8 を参照すると、図 7 のシステムにおける  
光パワー等のダイアグラムが示されている。第  
1 の光ファイバ 4 を構成する 2 つの D D - D C  
F 2 4 の各々においては、非線形効果（非線形  
係数  $\gamma$  及び光パワー  $P$  の積）が減少するのに伴  
って波長分散  $\beta_2$  が漸減しており、これにより  
非線形効果と波長分散の比（ $\gamma P / \beta_2$ ）がほ  
ぼ一定になるようにされている。

また、第 2 の光ファイバ 8 の途中には第 2 の  
光ファイバ 8 における光パワーをほぼ一定にす  
るために複数の光増幅器 3 0、3 4 及び 3 6 が  
5 設けられている。従って、この実施形態による  
と、パラメータが特別に設計されていない既設  
の光ファイバ伝送路を用いて或いは組み合わせて  
第 2 の光ファイバ 8 とすることができる。具  
体的には次の通りである。

今、第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 と  
10 して、図 7 に示されるように、複数の光ファイ  
バ 2 8 と複数の光増幅器 3 0 とからなる既設の  
伝送路が提供されているとする。一般に既設の  
伝送路においては波長分散の平均値は一定であ  
るから、光増幅器 3 0 の各々の利得を適切に設  
15 定することによって、第 2 の光ファイバ 8 の第  
1 の部分 8 1 における非線形効果と波長分散の  
比 ( $\gamma P / \beta_2$ ) を予め与えられた値  $x$  に設定  
することができる。伝送路についてこの比  $x$  が  
与えられると、端局 4 2 において、D D - D C  
20 F 2 4 の各々における非線形係数及び光パワー  
の積  $\gamma P$  の分布と波長分散  $\beta_2$  の分布とが設定  
される。そしてこれにより第 1 の光ファイバ 4  
における非線形効果と波長分散の比 ( $\gamma P / \beta_2$ )  
25 を第 2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 に  
関する比  $x$  に一致させることができる。その結

果、システム中間点 1 6 において波形が元に戻る  
るのである。

5           尚、ここでは第 1 の光ファイバ 4 の全長と第  
2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 とに関して  
一定の比  $x$  が得られるようにシステムが設計さ  
れているが、例えば第 1 の部分 8 1 を構成する  
光ファイバ 2 8 の各々が異なる波長分散  $\beta_2$  を  
有している場合には、第 1 の部分 8 1 には異なる  
波長分散を有する複数の区間が生じるので、  
10          第 1 の光ファイバ 4 についても本発明に従って  
複数の区間に仮想的に分割し、対応する 2 つの  
区間について前述した条件を満足させることに  
よって、システム中間点 1 6 において波形を元  
に戻すことができる。

15          第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 と第 3  
の光ファイバ 1 2 についても同じように設計す  
ることによって、光受信機 1 4 において波形を  
元に戻すことができる。図 8 の例では、第 2 の  
光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 と第 2 の部分 8  
20          2 が同じ値の波長分散を有しているとしてダイ  
アグラムが示されているが、異なる波長分散を  
有している場合であっても、端局 4 4 において  
光増幅器 4 0 の利得と  $DD-DCF$  3 8 の構成  
を適切に設定することによって、光受信機 1 4  
25          において波形を元に戻すことができる。

このようにこの実施形態によると、第2の光ファイバ8を伝送路として用いることによって、波長分散及び非線形性を補償した極めて長距離な伝送システムの構築が可能になる。また、端局42及び44にそれぞれ位相共役器6及び10を設けておくことによって、伝送路の途中に配置される1つの位相共役器も必要でないので、システムの保守性が向上する。即ち、一旦海底に敷設した伝送路については保守が極めて困難であることに鑑み、一般に複雑な構成を有する位相共役器は伝送路の途中に設けたくないという要求があるのであるが、本発明はこのような要求を満足するものである。

尚、図7のシステムにおいて、システム中間点16における波形改善を良好にするためには、光増幅器30の間隔を非線形係数と光パワーの積の逆数で与えられる非線形長よりも十分短くすることが望ましい。同様に、光受信機14における波形改善を良好にするためには、光増幅器34の間隔を非線形長よりも十分に短くすることが望ましい。つまり、光増幅器の間隔を非線形長に比べて十分小さくすることによって、光パワーが全長に渡って一定（の平均パワー）であるとして扱うことができるのである。この場合、光ファイバ8の分散が一定であるにもかか

わらず、位相共役器の前後で波長分散及び非線形効果の比が一定であるという条件が近似的に成り立つ。

5           ところで、図 7 のシステムにおいては、複数の光増幅器が用いられていることから、ノイズが累積する。例えば、各光増幅器が E D F A である場合には、E D F (エルビウムドープファイバ) において発生する A S E (A m p l i f i e d S p o n t a n e o u s E m i s s i o n) によるノイズが累積する。

10           本発明では、図 2 に示されるように、信号スペクトルは第 1 の光ファイバ 4 において徐々に広がり、第 1 の位相共役器 6 において信号スペクトルは一旦周波数軸上で裏返された後、第 2 の光ファイバの第 1 の部分 8 1 において信号スペクトルは再び徐々に狭くなり、システム中間点 1 6 において信号スペクトルは最も狭くなる。従って、本発明においては、システム中間点 1 6 において A S E によるノイズを効果的に除去

20           することができる。

          図 9 を参照すると、本発明のシステムに適用可能な光増幅器が示されている。光増幅媒体としての E D F 4 6 の第 1 端には、光カップラ 4 8 を介して増幅すべきビームとレーザダイオード 5 0 からの第 1 のポンプビームとが供給される。

25



EDF 4 6 の第 2 端には、光カプラ 5 2 を介してレーザダイオード 5 4 からの第 2 のポンプビームが供給される。第 1 及び第 2 のポンプビームによってポンピングされている EDF 4 6 に増幅すべきビームが供給されると、このビームは増幅され、光カプラ 5 2 及び光帯域通過フィルタ 5 6 を通ってこの光増幅器から出力される。EDF 4 6 において発生する ASE は増幅されたビームよりも十分広い帯域を有しているので、光帯域通過フィルタ 5 6 によって ASE の大部分を除去して増幅されたビームにおける S / N の低下を抑えることができる。

図 7 のシステムにおいて、システム中間点 1 6 に設けられる光増幅器 3 6 に例えば図 9 に示される光増幅器を適用する場合には、システム中間点 1 6 においては信号スペクトルが最も狭くなっていることから、信号スペクトルの帯域幅よりも僅かに広い通過帯域を有する光帯域通過フィルタをフィルタ 5 6 として用いることによって、累積した ASE によるノイズを効果的に除去することができる。

尚、図 9 の光増幅器では 2 つのレーザダイオード 5 0 及び 5 4 を用いて EDF 4 6 をポンピングしているが、何れか一方のレーザダイオードのみによって EDF 4 6 をポンピングしても

よい。

5       このように本発明の望ましい実施形態によると、第2の光ファイバ8におけるシステム中間点16の近傍に第1の位相共役ビームの波長を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタを設けておくことによって、S/Nの劣化を効果的に防ぐことができる。

10       図10を参照すると、本発明の第2実施形態を示す光通信システムが示されている。この実施形態は、図1の基本構成と対比して、第2の光ファイバ8におけるシステム中間点16に分岐ユニット58が設けられている点で特徴付けられる。

15       光送信機2が出力した信号ビームは第1の光ファイバ4により位相共役器6に供給される。位相共役器6は受けた信号ビームを位相共役ビームに変換して出力する。位相共役器6が出力した位相共役ビームは第2の光ファイバ8の第1の部分81により分岐ユニット58に供給される。分岐ユニット58は、受けた位相共役ビームを第1及び第2の分岐ビームに分岐する。第1及び第2の分岐ビームは、それぞれ、第2の光ファイバ8の第2の部分82-1及び82-2により位相共役器10-1及び10-2に供給される。位相共役器10-1は受けた第1

20

25

5 の分岐ビームを位相共役ビームに変換し、これを光ファイバ（第3の光ファイバ）12-1により光受信機14-1へ送る。位相共役器10-2は受けた第2の分岐ビームを位相共役ビームに変換し、これを光ファイバ（第3の光ファイバ）12-2により光受信機14-2へ供給する。

10 光ファイバ4及び81のパラメータ設定、光ファイバ82-1及び12-1のパラメータ設定、並びに光ファイバ82-2及び12-2のパラメータ設定は本発明に従って図1におけるのと同じようになされている。

15 分岐ユニット58はシステム中間点16に設けられているので、この分岐ユニット58において受けた位相共役ビームの伝送特性をモニタリングすることができる。そのために、分岐ユニット58にはモニタ回路60が付随的に設けられている。図示はしないが分岐ユニット58に光受信機を接続してもよい。

20 例えば、光送信機2、光ファイバ4及び位相共役器6は第1の大陸に設けられ、位相共役器10-1、光ファイバ12-1及び光受信機14-1は第2の大陸に設けられ、位相共役器10-2、光ファイバ12-2及び光受信機14-2は第3の大陸に設けられ、分岐ユニット5

25

8 及びモニタ回路 6 0 はこれらの大陸の間の島に設けられる。分岐ユニット 5 8 は正確にシステム中間点 1 6 に設けられていなくても良く、波形が十分に改善されているという条件の下に分岐ユニット 5 8 はシステム中間点 1 6 からある程度離れた位置に設けられていてもよい。

ここでは、本発明の第 2 実施形態を図 1 の基本構成に対比して説明したが、図 7 の第 1 実施形態を図 1 0 の第 2 実施形態に適用してもよい。また、図 1 0 では分岐ユニット 5 8 が第 1 及び第 2 の分岐ビームを出力するとしているが、分岐ユニット 5 8 が受けた位相共役ビームを 3 以上の分岐ビームに分岐し、これに対応して分岐ユニット 5 8 の下流側の位相共役器及び光受信機を増設してもよい。

図 1 1 を参照すると、本発明の第 3 実施形態が示されている。ここでは、図 1 の基本構成を W D M (波長分割多重) に拡大適用するために、光マルチプレクサ (M U X) 6 2 及び光デマルチプレクサ (D E - M U X) 6 4 が用いられている。

光送信機 2 - 1 , ... , n ( n は 1 よりも大きい整数) は、互いに異なる波長を有する信号ビームをそれぞれ出力する。信号ビームは図 1 の第 1 の光ファイバ 4 にそれぞれ対応する光ファ

イバ 4 - 1, ..., n によって光マルチプレクサ  
6 2 に供給される。光マルチプレクサ 6 2 は、  
受けた信号ビームを波長分割多重して W D M 信  
号ビームを出力する。そしてこの W D M 信号ビ  
ームが第 1 の位相共役器 6 に供給される。ここ  
では、光送信機 2 - 1, ..., n のそれぞれに専  
用の光ファイバ 4 - 1, ..., n が与えられてい  
るので、各波長チャンネル毎に本発明によるパラ  
メータの設定が可能である。即ち、波長チャネ  
ルによって非線形係数や波長分散が異なるので、  
この実施形態によると波長チャンネル毎の厳密な  
補償が可能になる。

位相共役器 6 において位相共役変換された W  
D M 信号ビームは第 2 の光ファイバ 8 により第  
2 の位相共役器 1 0 に供給され、ここで更に位  
相共役変換される。位相共役器 1 0 の出力ビー  
ムは光デマルチプレクサ 6 4 に供給される。光  
デマルチプレクサ 6 4 は受けたビームを波長チ  
ャネル毎に分離し、各チャンネルのビームは図 1  
の第 3 の光ファイバ 1 2 に対応する光ファイバ  
1 2 - 1, ..., n によってそれぞれ光受信機 1  
4 - 1, ..., n に供給される。光ファイバ 4 -  
1, ..., n の各々と第 2 の光ファイバ 8 の第 1  
の部分 8 1 についてのパラメータ設定は図 1  
の基本構成におけるのと同じようになされてお

り、第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 8 2 と光ファイバ 1 2 - 1, ..., n の各々についてのパラメータ設定も図 1 におけるのと同じようになされている。

5       この実施形態では、位相共役器 1 0 が出力したビームを n チャネルに分けるために、光デマルチプレクサ 6 4 を用いているが、1 つの光受信機を用いる場合には光デマルチプレクサ 6 4 は不要である。この場合には、光受信機は n チャネルから所望のチャネルを選択するための光学的或いは電氣的な手段を有している。

10       尚、第 3 実施形態を図 1 の基本構成に対比して説明したが、図 7 の第 1 実施形態を第 3 実施形態に適用してもよい。

15       図 1 2 を参照すると、本発明の第 4 実施形態が示されている。ここでは、図 1 の基本構成と対比して、光ファイバ 4、8 及び 1 2 の各々の波長分散と逆符号の波長分散を与える少なくとも 1 つの分散補償器 (D C) 6 6 が付加的に設けられている。図示された例では、分散補償器 20       6 6 は位相共役器 6 及び 1 0 の間の光ファイバ 8 の途中に設けられているが、分散補償器 6 6 は光ファイバ 8 の入力端又は出力端に接続されていてもよい。また、分散補償器 6 6 は、光ファイバ 4 の途中に設けられ若しくは入力端若し

25

くは出力端に接続され又は光ファイバ 1 2 の途中に設けられ若しくはその入力端若しくは出力端に接続されていてもよい。

分散補償器 6 6 としては絶対値が大きい波長分散を有する分散補償ファイバ ( D C F ) を用いることができる。光ファイバ 4 、 8 及び 1 2 の各々の分散が正常分散或いは異常分散の何れである場合でも、 D C F からなる分散補償器 6 6 を用いることによって、その長さを短く抑えることができるので、分散補償器 6 6 における損失を小さく抑えることができる。特に、光ファイバ 4 、 8 及び 1 2 の各々が正常分散を有している場合には、分散補償器 6 6 としては 1 . 3  $\mu$  m 零分散ファイバが適している。例えば複数の分散補償器 6 6 を光ファイバ 8 の途中に設ける場合には、その長手方向に分散補償器 6 6 を均等間隔で設けるのが望ましい。

図 1 2 では図 1 の基本構成に分散補償器 6 6 が付加されているが、本発明の第 1 乃至第 3 実施形態において少なくとも 1 つの分散補償器を付加的に設けてもよい。

図 1 3 を参照すると、ファイバグレーティング F G を用いた分散補償器の構成が示されている。この分散補償器は図 1 2 の分散補償器 6 6 として、或いは後述の用途で用いることができ

る。光パルスの両縁の波長がそれぞれ $\lambda_1$ 及び $\lambda_2$ である光パルスが光サーキュレータOCを  
通ってファイバグレーティングFGに供給され  
る。ファイバグレーティングFGのグレーティ  
ングピッチは予め定められた分布を有しており、  
波長 $\lambda_1$ のビームは光サーキュレータOCに比  
較的近い位置でブラッグ反射され、波長 $\lambda_2$ の  
ビームは比較的遠い位置でブラッグ反射される。  
これにより光パルスの圧縮が行われ、ファイバ  
グレーティングFGからのブラッグ反射ビーム  
を光サーキュレータOCを介して取り出すこと  
によって、分散補償を行うことができる。

図14を参照すると、本発明の第5実施形態  
が示されている。ここでは、図1の基本構成と  
対比して、第1の光ファイバ4、第1の位相共  
役器6、第2の光ファイバ8、第2の位相共役  
器10及び第3の光ファイバ12にそれぞれ相  
当する光学要素を含む光学ユニット68を更に  
備えたシステムが示されている。光学ユニット  
68の第1端は、図1の光受信機14に対応す  
る点Aにおいて第3の光ファイバ12に接続さ  
れ、光学ユニット68の第2端は光受信機14  
'に接続される。光学ユニット68は、光ファ  
イバ4、位相共役器6、光ファイバ8、位相共  
役器10及び光ファイバ12にそれぞれ相当す



る光ファイバ 4'、位相共役器 6'、光ファイ  
バ 8'、位相共役器 10' 及び光ファイバ 12'  
'を含む。光学ユニット 68 は図 1 のシステム  
中間点 16 に対応するシステム中間点 16' を  
有している。図 14 の実施形態では、光学要素  
5 68 を 1 つだけ示しているが、点 A と光受信機  
14' との間に光学ユニット 68 が複数直列に  
設けられていてもよい。

この実施形態によると、図示されたシステム  
の各部分について本発明の条件を適用すること  
によって、光送信機 2 と光受信機 14' との間の  
距離を十分に伸ばすことができる。また、シ  
ステム中間点 16 及び 16' 並びに点 A におい  
ては光信号の波形が元に戻っているため、これ  
らの点にノードを設けることによって、光信号  
15 のアッド／ドロップ或いは光信号波形のモニタ  
リングを容易に行うことができる。また、シ  
ステム中間点 16 及び 16' 並びに点 A の少なく  
とも何れかに図 9 の光増幅器の光帯域通過フイ  
ルタ 56 を適用することによって、ASE によ  
るノイズを効果的に除去することができる。

尚、ここでは第 5 実施形態を図 1 の基本構成  
に対比して説明したが、図 7 の第 1 実施形態を  
第 5 実施形態に適用してもよい。

図 15 を参照すると、本発明の第 6 実施形態

が示されている。図 1 1 の第 3 実施形態では、  
図 1 の基本構成を W D M（波長分割多重）に適  
用するために、複数の光送信機  $2-1, \dots, n$   
に対応して複数の第 1 の光ファイバ  $4-1, \dots,$   
5  $n$  を設け、複数の光受信機  $14-1, \dots, n$  に  
対応して複数の第 3 の光ファイバ  $14-1, \dots,$   
 $n$  を設けている。これに対して、図 1 5 の第 6  
実施形態では、光送信機  $2-1, \dots, n$  の直後  
に光マルチプレクサ  $62'$  を設け、光マルチプ  
10 レクサ  $62'$  と第 1 の位相共役器 6 との間に共  
通の第 1 の光ファイバ 4 を設けている。また、  
光受信機  $14-1, \dots, n$  の直前に光デマルチ  
プレクサ  $64'$  を設け、第 2 の位相共役器 10  
と光デマルチプレクサ  $64'$  との間に共通の第  
15 3 の光ファイバ 12 を設けている。

光送信機  $2-1, \dots, n$  が出力する信号ビー  
ムの波長は互いに異なる。従って、もし、光送  
信機  $2-1$  と光受信機  $14-1$  とに関する波長  
チャンネルについて (1) ~ (4) 式の条件が満  
20 たされているとすれば、その波長チャンネルにつ  
いてはシステム中間点 16 において波形が完全  
に元に戻るが、他の波長チャンネルについては厳  
密な意味では (1) ~ (4) 式を満足することが  
できないので、当該他の波長チャンネルについ  
25 てはシステム中間点 16 において波形が完全に

は元には戻らないかもしれない。しかし、本発明では、システム中間点 16 を中心として対称な条件設定を行うことによって、システム中間点 16 で波形が完全に元に戻らない波長チャンネルについても受信側で波形を実質的に完全に元に戻すことができる。

図 16 を参照すると、本発明の第 7 実施形態が示されている。ここでは、図 15 の第 2 の光ファイバ 8 の第 2 の部分 82 と、位相共役器 10 と、第 3 の光ファイバ 12 とが省略され、システム中間点 16 に光デマルチプレクサ 64 が設けられている。図 16 の位相共役器 6 が 3 次の非線形光学媒質を有しているとした場合における分散パラメータの設計例を説明する。

図 17 A に示されるように、光送信機 2-1, ..., n が出力する信号ビームの波長がそれぞれ  $\lambda_{s1}, \dots, \lambda_{sn}$  とした場合、位相共役器 6 が出力する位相共役ビームの波長  $\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{cn}$  は、それぞれ、ポンプ光の波長  $\lambda_p$  に対して信号ビームの波長  $\lambda_{s1}, \dots, \lambda_{sn}$  と対称の位置に配置される。もし、図 16 のシステムにおいて、位相共役器 6 の前後の光ファイバ 4 及び第 1 の部分 81 として同じ種類の光ファイバが用いられており、そのファイバが図 17 A に D<sub>1</sub> で示されるように分散パラメータが波長に依存して変

化する特性を有しているとする、信号ビームが受ける波長分散がチャンネル毎に異なるので、補償が不完全になるかもしれない。そこで、図 1 7 A に示される例では、波長  $\lambda_{s1}, \dots, \lambda_{sn}$  の信号ビームが伝搬する光ファイバ 4 として  $D_1$  で示されるような特性のファイバを用いている場合には、波長  $\lambda_{c1}, \dots, \lambda_{cn}$  の位相共役ビームが伝搬する第 1 の部分 8 1 として  $D_2$  で示されるようにポンプ光の波長  $\lambda_p$  に対して  $D_1$  と対称の特性を有するようなファイバを用いるのである。例えば、第 1 の光ファイバ 4 の分散傾斜（2 次分散；分散パラメータの波長微分）が正である場合には、第 1 の部分 8 1 の分散傾斜を負にするのである。このようにして、各チャンネルの信号ビームが受ける波長分散と対応する位相共役ビームが受ける波長分散とが等しくなるようにすることによって、波長分散及び非線形性をチャンネル毎に補償することができる。

特に、WDM が適用される場合には、各チャンネルについて発生する SPM だけでなく、チャンネル間の相互作用による XPM（相互位相変調）によっても波形劣化が生じるが、図 1 7 A に示されるように分散パラメータを設計することによって、XPM を補償することができる。

尚、図 1 6 の実施形態に DD-DCF を適用す

る場合には、 $DD-DCF$ の各々として例えば  
図17Aのものの特性を縦方向にシフトしたも  
のをを用いることができる。

5 図17Bに示されるように、分散傾斜がない  
ファイバを用いることもできる。即ち、位相共  
役器6の前後において、光ファイバ4としては  
分散パラメータ $D_1$ が波長に従って変化しない  
ファイバを用いるとともに、第1の部分81と  
10 としては分散パラメータ $D_2$ が波長に従って変化  
しないファイバを用いるのである。このように  
分散傾斜のないファイバを用いることによって、  
SPM及びXPMによる波形劣化だけでなく、  
チャネル間のFWMを補償することができる。  
FWMの発生効率は各ファイバの分散値に依存  
15 するので、光ファイバ4と第1の部分81とで  
分散パラメータを同じにするのが望ましい。尚、  
チャネル間のFWMの発生効率は偏波依存性を  
有しているので、図16のようにWDMが適用  
される場合には、光送信機 $2-1, \dots, n$ の各  
20 々の直後或いは光マルチプレクサ62'の直後  
に偏波スクランブラを設けるのが望ましい。ま  
た、図17Bに示されるような特性を有するフ  
ァイバを用いて $DD-DCF$ を構成することも  
できる。

25 図18A及び18Bを参照すると、本発明が

適用可能な光ネットワークが示されている。図  
1 8 A に示される光ネットワークにおいては、  
3 つの端局 7 0 の間がそれぞれ光ファイバによ  
り接続されており、各光ファイバの途中には光  
5 信号のアッド／ドロップのためのノード 7 2 が  
設けられている。ターミナル 7 0 の各々は図 1  
の位相共役器 6 又は 1 0 を有しており、光ファ  
イバの各々について本発明の条件が満足される  
ようにしてある。各ノード 7 2 は本発明に従う  
10 システム中間点 1 6（図 1 参照）に配置されて  
いる。システム中間点では波形が元に戻ってい  
るので、システム中間点にノード 7 2 を配置す  
ることによって、波形の劣化を考慮することな  
しに光信号のアッド／ドロップが可能になる。

15 図 1 8 A の光ネットワークに W D M が適用さ  
れる場合には、各ターミナル 7 0 は W D M のチ  
ャネル毎に位相共役器を有していることが望ま  
しい。このように各ターミナル 7 0 が複数の位  
相共役器を有する場合には、光信号がターミナ  
ル 7 0 を通過するときに位相共役変換及び波長  
20 変換がチャネル毎に行われるので、各ターミナ  
ル 7 0 において光信号の分岐や切り換え（クロ  
スコネクト）が可能になる。

図 1 8 B に示される光ネットワークにおいて  
25 は、2 つのターミナル 7 0 が幹線上に配置され、

ターミナル 7 0 の間にノード 7 2 が設けられている。また、ターミナル 7 0 の各々はサブシステム 7 4 に接続されている。サブシステム 7 4 の各々はリング状光ファイバネットワークとその途中に設けられる複数のノード 7 6 とを有している。

この構成によると、例えば幹線ネットワークに W D M が適用されている場合に、W D M の各チャンネルをサブシステム 7 4 の各々に割り当てることで、比較的低速な L A N (ローカルエリアネットワーク) を容易に提供することができる。

図 1 9 を参照すると、本発明による光通信システムの他の基本構成が示されている。このシステムは、信号ビームを出力する光送信機 1 0 2 と、信号ビームを伝送するための第 1 の光ファイバ 1 0 4 と、第 1 の光ファイバ 1 0 4 により伝送された信号ビームを位相共役ビームに変換して出力する位相共役器 1 0 6 と、位相共役ビームを伝送する第 2 の光ファイバ 1 0 8 と、第 2 の光ファイバ 1 0 8 により伝送された位相共役ビームを受ける光受信機 1 1 0 とを備えている。

第 1 の光ファイバ 1 0 4 、位相共役器 1 0 6 及び第 2 の光ファイバ 1 0 8 を含む光路上には、

光ファイバ 1 0 4 及び 1 0 8 の各々の波長分散  
と逆符号の波長分散を与える少なくとも 1 つの  
分散補償器 1 1 2 が設けられている。図示され  
た例では分散補償器 1 1 2 は第 2 の光ファイバ  
1 0 8 の途中に設けられているが、分散補償器  
1 1 2 は第 1 の光ファイバ 1 0 4 の途中に設け  
られていてもよい。また、分散補償器 1 1 2 は  
光ファイバ 1 0 4 又は 1 0 8 の端部に設けられ  
ていてもよい。

第 1 の光ファイバ 1 0 4 及び第 2 の光ファイ  
バ 1 0 8 のパラメータ設定は、それぞれ、図 1  
のシステムにおける第 1 の光ファイバ 4 及び第  
2 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1 のパラメー  
タ設定に準じて行われる。例えば、第 1 の光フ  
ァイバ 1 0 4 の波長分散の平均値及び長さの積  
は、第 2 の光ファイバ 1 0 8 の波長分散の平均  
値及び長さの積に実質的に一致するようにされ  
る。各波長分散の平均値を求めるためには、分  
散補償器 1 1 2 の分散値を含めてもよいし含め  
なくてもよい。

図 1 9 のシステムを実施する場合、光ファイ  
バ 1 0 4 又は 1 0 8 として、波長  $1.55 \mu\text{m}$   
帯で最低損失及び異常分散を与えるシングルモ  
ードファイバを使用したいという要求がある。  
その理由は、第 1 に、このようなシングルモー



ドファイバからなる光ファイバ伝送路が既に多くの地域で敷設されておりこれをそのまま利用したいという点と、第2に、波長 $1.55\mu\text{m}$ 帯でWDMを実施する場合にシングルモードファイバでは比較的大きな異常分散が生じることによりXPM及びFWMによるチャネル間クロストークが生じにくいという点とに基づく。

分散補償器112が無い場合、光ファイバ104を端局内に設け、光ファイバ108を伝送路として使用しようとする、光ファイバ104を比較的に短くする必要がある、例えば光ファイバ108の分散パラメータが $+18\text{ps/km/nm}$ である場合に、光ファイバ104の分散パラメータをそれより大きな値にする必要があるのであるが、現状ではこのような大きな異常分散を与える光ファイバは入手困難であるから、システムが制限されてしまう。これに対して、図19のように分散補償器112を用いることによって、光ファイバ108の総分散を小さくすることができるので、光ファイバ108の分散パラメータと同等の分散パラメータを有する光ファイバ104の使用が可能になるのである。

図示された例では、分散補償器112は1つだけ設けられているが、複数の分散補償器を長

手方向に例えば均等に配置することによって、  
本発明の条件の設定を容易に行うことができる  
ようになる。

5 尚、光ファイバ 1 0 4 及び 1 0 8 が異常分散  
を与えるシングルモードファイバである場合に  
は、分散補償器 1 1 2 としては正常分散を与え  
る光ファイバを用いることができる。また、図  
1 3 により説明したファイバグレーティングを  
用いた分散補償器を用いることもできる。

10 以下、本発明の付加的な説明を行う。本発明  
を実施する場合、最も単純には、図 2 並びに  
( 2 2 ) 及び ( 2 3 ) 式から明らかなように、  
位相共役器の前後における総分散及び / 又は総  
非線形効果がそれぞれ等しく設定される。( 2  
15 2 ) 及び ( 2 3 ) 式においては、 $D_j$  及び  $\gamma_j$   
(  $j = 1, 2$  ) を定数として扱っているが、実  
際のパラメータ設定では、分散値及び非線形係  
数はファイバの位置により異なる値を示すから、  
正確を期するためにはこれらの平均値が採用され  
る。

20 ( 2 2 ) 及び ( 2 3 ) 式による補償は、非線  
形効果が余り大きくない場合に成り立つ近似で  
ある。具体的は、光ファイバの長さ或いは光増  
幅器による中継間隔が光ファイバの非線形長に  
25 比べて十分短い場合に有効な近似である。例え

ば、非線形係数が  $2.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  である通常の D S F（分散シフトファイバ）により平均ピークパワー + 5 d B m の信号光を伝送する場合を考えると、非線形長は  $121.6 \text{ km}$  となる。従って、 $100 \text{ km}$  程度よりも短い光ファイバ長或いは光増幅器による中継間隔であれば、上述の近似により波長分散及び非線形効果を補償することができることになる。

しかし、パワーが更に高くなると、光ファイバの損失による位相共役器前後の光パワー分布の非対称性により補償に限界が出る。このような場合には、本発明に従って (20) 及び (21) 式の条件を満足させることによって、波長分散及び非線形効果による波形歪みを補償することができる。

一般的には伝送路には損失があるため、(20) 及び (21) 式を満足するためには、何らかの損失補償効果を与える必要がある。これにはいくつかの方法が考えられる。第1に、伝送路として分布定数的な利得媒質を用いることである。ラマン増幅器や E D F を用いたインライン型の増幅器等が挙げられる。第2に、非線形効果と分散値の比を制御することである。損失によって非線形効果が伝送路に沿って減少することを補償するためには、伝送路に沿って分散

を小さくしていくか或いは非線形効果を大きくしていけばよい。分散の値を変化させることは、光ファイバの設計により可能であり、有望である。例えば、分散シフトファイバ (DSF) の零分散波長を変化させることや、ファイバのコア及びクラッド間の比屈折率差或いはファイバのコア径を変えることにより、分散の値を変化させることができる。一方、非線形効果を変化させることは、非線形屈折率を変化させたり光パワーを変化させることにより可能である。

損失のある伝送路に沿って光強度を大きくするには、ファイバの有効コア断面積  $A_{eff}$  をファイバの長手方向に沿って次第に小さくすればよい。例えば、モードフィールド径 (MFD) が半分になれば、光強度は約 4 倍になる。従って、6 dB 程度の損失はこれだけで補償可能である。もっと大きな損失に対しては更に MFD を小さくする必要があるが、余り MFD を小さくし過ぎるとそれにより損失が増えてしまい逆効果となる。現実的な MFD の最小値は  $3 \mu m$  程度であろう。1.  $3 \mu m$  零分散 SMF (シングルモードファイバ) の MFD が約  $10 \mu m$ 、1.  $55 \mu m$  零分散 DSF (分散シフトファイバ) のそれが約  $8 \mu m$  であることを考慮すると、MFD だけで対応可能な損失は SMF で約 10

d B、D S Fでは約 8 d Bということになる。

5 更に大きな損失がある場合には、M F Dを小さくすると共に分散の値を小さくすることが考えられる。例えば、分散の値を半分にできれば、更に 3 d Bの損失のある場合でも分散と非線形効果との比を位相共役器に対して対称にすることが可能である。近年開発が進められている分散補償ファイバ（D C F）においては、分散値を約  $-120 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  から  $-10 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  程度の範囲で変化させることが可能であり、しかも M F Dを  $5 \mu \text{m}$  以下にすることもできる。従って、分散値の異なる複数の D C Fを例えばスプライシングによりカスケード接続することによって、10 d B程度の損失の補償が可能となる。

15 伝送路（例えば図 7 の光ファイバ 8 の第 1 の部分 8 1）の平均分散が  $-0.5 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  であるとする、補償ファイバ（例えば図 7 の第 1 の光ファイバ 4）の平均分散を  $-50 \text{ ps} / \text{nm} / \text{km}$  にすることにより、伝送路の 1 / 100 の長さの補償ファイバによりシステムを構築可能である。この場合、例えば補償ファイバの損失が  $0.4 \text{ dB} / \text{km}$  であれば、分散値の絶対値を  $0.4 \text{ dB} / \text{km}$  の割合で小さくしていくことにより、補償条件を実現するこ

20

25

とができる。伝送路の全長が 2 0 0 0 k m である場合には 2 0 k m の補償ファイバを用いることになり、その際の分散値の差は 8 d B である。尚、補償ファイバ内の光強度も伝送路における光強度の 1 0 0 倍程度にする必要があるが、例えば補償ファイバの M F D が 4  $\mu$  m であれば光パワーとしては 2 5 倍程度で済むことになる。

光増幅器を用いた長距離伝送においては、伝送路として正常分散ファイバを用いることが光増幅器の雑音光による非線形歪みを低減する上でよいことが分かっている。従って、上述の D C F を用いたシステム構成は有望である。

図 6 の位相共役器において、非線形光学媒質として用いられる光ファイバ 1 8 に供給される信号光若しくはポンプ光又は光ファイバ 1 8 において発生する位相共役光のパワーが光ファイバ 1 8 における誘導ブリュアン散乱 ( S B S ) の閾値を越えると、信号光から位相共役光への変換効率が小さくなる。S B S の影響を抑圧するためには、信号光及びポンプ光の少なくとも何れか一方に周波数変調又は位相変調を掛ければよい。その際の変調速度は数 1 0 0 k H z 程度で十分であり、この変調速度は信号光における変調速度よりも一般に十分に低いので、S B S を抑圧するための変調により伝送特性が劣化

する恐れはない。

通常の D S F (分散シフトファイバ) の非線形係数  $\gamma$  は  $2 \cdot 6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  程度と小さいので、位相共役光を発生させるための非線形光学媒質、例えば図 6 の光ファイバ 18 として通常の D S F を用いる場合に十分な変換効率を得るためには、ファイバ長を  $10 \text{ km}$  以上にすることが要求される。従って、ファイバ長を短くするのに十分大きな非線形係数  $\gamma$  を有する D S F の提供が要望されているのである。位相共役光を発生させるための非線形光学媒質として使用される D S F の長さを短くすることができるとすれば、その零分散波長を高精度に管理することができ、従ってポンプ光の波長を D S F の零分散波長に正確に一致させるのが容易になり、その結果広い変換帯域を得ることができる。ここで、変換帯域は、あるパワーの位相共役光が得られる条件下におけるポンプ光及び信号光の最大の離調波長 (離調周波数) として定義される。

(6) 式により定義される非線形係数  $\gamma$  を大きくするためには、非線形屈折率  $n_2$  を大きくし或いは有効コア断面積  $A_{\text{eff}}$  に対応するモードフィールド径 (M F D) を小さくすることが有効である。非線形屈折率  $n_2$  を大きくするためには、例えば、クラッドにフッ素等をドーブ

し或いはコアに高濃度の  $\text{GeO}_2$  をドーブすればよい。コアに  $\text{GeO}_2$  を 25 乃至 30 mol %ドーブすることによって、非線形屈折率  $n_2$  として  $5 \times 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$  以上の大きな値が得られている（通常のシリカファイバでは約  $3.2 \times 10^{-20} \text{ m}^2 / \text{W}$ ）。MFD を小さくすることは、比屈折率差  $\Delta$  又はコアの形状の設計により可能である。このような DSF の設計は DCF（分散補償ファイバ）の場合と同様である。例えば、コアに  $\text{GeO}_2$  を 25 乃至 30 mol %ドーブし、且つ、比屈折率差  $\Delta$  を 2.5 乃至 3.0 % に設定することによって、 $4 \mu\text{m}$  よりも小さな MFD の値が得られている。これらの総合効果として、 $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  以上の大きな非線形係数  $\gamma$  の値が得られている。

他に重要な要素として、このような大きな値の非線形係数  $\gamma$  を提供する DSF がポンプ帯域に含まれる零分散波長を有するべきであることが挙げられる。零分散波長とポンプ帯域とのこのような一致性は、ファイバパラメータ（例えば比屈折率差  $\Delta$  及び MFD）を次のようにして設定することにより可能である。通常の光ファイバにおいては、MFD を一定にした条件で比屈折率差  $\Delta$  を大きくすると、分散値は正常分散領域で大きくなる。位相共役器による前置補償



或いは後置補償に用いられる前述のような D D  
- D C F はこのような原理により実現するもの  
である。一方、コア径を大きくすると分散は減  
少し、コア径を小さくすると分散は大きくなる。  
5 従って、M F D をポンプ帯域に適合するある値  
に設定した後に、零分散波長がポンプ光の予め  
定められた値に一致するようにコア径を調節す  
ることによって、ポンプ光に対する零分散が得  
られる。

10 長さ  $L$ 、損失  $\alpha$  の光ファイバにおける変換効  
率  $\eta_c$  は、

$$\eta_c = \exp(-\alpha L) (\gamma P_p L)^2 \quad \dots (24)$$

15 で近似することができる。ここで、 $P_p$  は平均  
ポンプ光パワーである。従って、非線形係数  $\gamma$   
が  $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  のファイバは通常の D S F に  
比べて  $2.6 / 1.5 \approx 1 / 5.7$  程度の長さで  
同じ変換効率を達成可能である。通常の D S F  
20 にあっては、十分大きな変換効率を得るため  
には前述のように  $10 \text{ km}$  程度の長さが必要であ  
るのに対して、このように大きな非線形係数  $\gamma$   
を有するファイバにあっては、 $1$  乃至  $2 \text{ km}$  程  
度の長さで同様の変換効率を得ることができる。  
25 実際には、ファイバ長が短くなる分損失も小さ

5 くなるので、同じ変換効率を得るために更にファイバ長を短くすることができる。このような短い長さのDSFにおいては、零分散波長の制御性が良くなり、従って、ポンプ光の波長を零分散波長に正確に一致させることができ、広い変換帯域を得ることができる。更に、数kmのファイバ長であれば、偏波面保存能力が確保されているので、このようなDSFの使用は、高い変換効率及び広い変換帯域を達成し偏波依存性を排除する上で極めて有効である。

10 光ファイバを用いて四光波混合を有効に発生させるためには、信号光、ポンプ光及び位相共役光の位相を整合させることが重要である。位相不整合量 $\Delta k$ は次のように近似される。

15 
$$\Delta k = \delta \omega^2 \beta_2 (\omega_p) + 2 \gamma P_p \dots (25)$$

20 ここに、 $\beta_2 (\omega_p)$ はポンプ光周波数 $\omega_p$ における波長分散であり、 $\delta \omega$ は信号光及びポンプ光の周波数差である。特別大きなパワー（例えば100mW以上）のポンプ光を用いない限り、(25)式の第2項は第1項に比べて十分小さいのでこれを無視することができる。従って、位相整合（ $\Delta k$ を限りなく0に近付けること）は、ポンプ光の波長をファイバの零分散波

25

長に一致させることにより得られる。しかし、実際のファイバにおいては、零分散波長が長手方向にばらついているので、位相整合条件をファイバ全長に渡って保つことが容易ではない。

5        このように、位相共役光を発生するための非線形光学媒質として光ファイバを有している装置においては、変換帯域は光ファイバの分散により制限される。従って、光ファイバの長手方向の分散が完全に制御され、例えば全長（正確には非線形長）に渡り唯一の零分散波長を有する光ファイバが作られたとすれば、ポンプ光波長をその零分散波長に合わせることにより、事実上無限大の（分散傾斜が直線上である範囲内で制限のない程広い）変換帯域が得られる。しかし、実際には、光ファイバの製造技術上の問題により零分散波長が長手方向にばらつくため、位相整合条件が理想状態からずれ、これにより変換帯域が制限される。

10

15

20        しかし、このような場合であっても、光ファイバを切断して複数の小区間に分割し、零分散波長の似ている区間同士をスプライス等により繋ぎ合わせていく（当初のファイバ端から数えた順番とは違う順番で）ことにより、全長における平均分散は同じであるにも関わらず、広い変換帯域を有する位相共役器を提供するのに適

25

した光ファイバを得ることができる。

5 或いはまた、十分広い変換帯域を得るのに必要な程度に高精度な分散制御が可能な長さ（例えば数 1 0 0 m 以下）のファイバを予め多数用意しておき、所要の零分散波長のものを組み合わせてスプライスして所要の変換効率を得るのに必要な長さのファイバを得、これを用いて位相共役器を提供することによって、広い変換帯域を得ることができる。

10 このようにして変換帯域を拡大する場合には、非線形光学媒質のポンプ光入力端の近くでポンプ光のパワーが高いので、ポンプ光入力端の近くに零分散波長の小さい部分或いは零分散波長のばらつきが小さい部分を集めることが有効である。また、必要に応じて順次分割数を増やしたり、ポンプ光入力端から離れた位置で比較的分散値の大きなところでは、分散値の正負を交互に配置する等により適切に組み合わせることによって、更に変換帯域を拡大することができる。

20 光ファイバを分割するに際して各区間をどの程度短くすれば十分か否かの目安としては、例えば、非線形長を基準にすればよい。非線形効果の補償におけるのと同様、非線形長に比べて十分短いファイバ内での F W M（四光波混合）

25

においては、位相整合はそのファイバの平均分散値に依存すると考えることができる。一例として、非線形係数  $\gamma$  が  $2.6 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  のファイバで  $30 \text{ mW}$  程度のポンプ光パワーを用いた FWM においては、非線形長は  $12.8 \text{ km}$  程度になるから、その  $1/10$  程度、即ち  $1 \text{ km}$  程度が 1 つの目安となる。他の例としては、非線形係数  $\gamma$  が  $15 \text{ W}^{-1} \text{ km}^{-1}$  のファイバで  $30 \text{ mW}$  程度のポンプ光パワーを用いた FWM においては、非線形長は  $2.2 \text{ km}$  程度になるから、その  $1/10$  程度、即ち  $200 \text{ m}$  が 1 つの目安となろう。何れにしても、非線形長に比べて十分短いファイバの平均零分散波長を測定し、ほぼ同じ値のものを組み合わせて所要の変換効率を有する非線形光学媒質を提供すれば、広い変換帯域の位相共役器を得ることができる。

このように、本発明によると、位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための第 1 の方法が提供される。この方法では、まず、光ファイバが切断されて複数の区間に分割され、次いで、非線形光学媒質を用いた非縮退四光波混合における変換帯域が最大になるように複数の区間が並べ替えられて繋ぎ合わされることにより非線形光学媒質が提供される。この非線形光学媒質にポンプ光及び信

号光を供給することによって、位相共役光が発生する。信号光から位相共役光への変換帯域は十分に広がっているので、例えば信号光として、異なる波長を有する複数の光信号を波長分割多重してなるWDM信号光が用いられている場合に、複数の光信号は一括して位相共役光（複数の位相共役光信号）に変換される。

望ましくは、複数の区間の各々の分散値（例えばポンプ光に対する分散値）が測定され、非線形光学媒質にポンプ光を入力するときの入力端に近い側に比較的分散値の小さい区間が配置されるように複数の区間が並べ替えられる。これにより、ポンプ光のパワーが高い部分で効果的に位相整合条件を得ることができるので、変換帯域が効果的に拡大される。

望ましくは、複数の区間の少なくとも一部は分散値の正負が交互になるように繋ぎ合わされる。これにより、光ファイバの各部分の平均分散を小さく抑えることができるので、変換帯域の効果的な拡大が可能になる。

また、本発明によると、位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための第2の方法が提供される。この方法では、まず、光ファイバが切断されて複数の区間に分割され、次いで、複数の区間の各々の分散

値（例えばポンプ光に対する分散値）が測定され、その後、非線形光学媒質を用いた非縮退四光波混合による所要の変換帯域を得るのに十分小さい分散値を有する区間だけが選ばれて繋ぎ合わされることにより非線形光学媒質が得られる。この第2の方法により得られた非線形光学媒質を用いて位相共役器を構成した場合にも、広い変換帯域が得られているので、WDM信号光の一括変換が可能である。

本発明による第1及び第2の方法の各々においては、最初に光ファイバが切断されて複数の区間に分割されるが、本発明はこれに限定されない。例えば、次のように必要に応じて光ファイバを切断することもできる。

即ち、本発明によると、位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための第3の方法が提供される。この方法では、まず、光ファイバの零分散波長の偏差が測定され、次いで、測定された偏差が予め定められた範囲を越えている場合に光ファイバが切断され切断された各ファイバの零分散波長の偏差が予め定められた範囲内に入るようにされ、その後、ポンプ光の波長に実質的に等しい零分散波長を有する光ファイバ又は切断されたファイバが選ばれて、選ばれたファイバを繋ぎ合わせ

ることにより非線形光学媒質が得られる。

5 零分散波長の偏差の測定は、例えば、零分散波長に従って四光波混合の発生効率が異なることを用いて行うことができる。一般に、波長分散は群速度の波長依存性を測定することにより求めることができるのであるが、上述のように、四光波混合の位相整合はポンプ光波長と零分散波長とが一致するときに最良の条件となるので、  
10 零分散波長は、ポンプ光と信号光の波長差を例えば  $10 \sim 20 \text{ nm}$  程度の比較的大きな一定の値にした状態でポンプ光波長に対する四光波混合（位相共役光）の発生効率を測定し、最大の発生効率を与えるポンプ光波長として求めることができる。また、四光波混合の発生効率はポンプ光の強度の二乗に比例する。従って、零分散波長が光ファイバの長手方向に変化している  
15 場合、一般的には、信号光及び励起光を光ファイバの一方の端面から入力した場合と他方の端面から入力した場合とで異なる零分散波長が測定される。従って、これら2つの零分散波長の  
20 測定値に基づいてその光ファイバの零分散波長の偏差を求めることができる。具体的には次の通りである。

25 図 20 を参照すると、零分散波長の偏差が小さい非線形光学媒質の製造プロセス 120 が示



されている。ステップ 1 2 2 においては、零分散波長の許容範囲  $\Delta \lambda_0$  が決定される。範囲  $\Delta \lambda_0$  は、所要の変換帯域からシステムの要求特性として決定することができ、その具体的な値は例えば 2 nm である。次いでステップ 1 2 4 では、零分散波長の偏差  $\delta \lambda$  が測定される。例えば、光ファイバ F 1 が与えられると、前述の四光波混合の発生効率により、信号光及び励起光を光ファイバ F 1 の第 1 端から入力した場合に得られる零分散波長  $\lambda_{01}$  と、光ファイバ F 1 の第 2 端から信号光及びポンプ光を入力した場合に得られる零分散波長  $\lambda_{02}$  とが測定される。この場合、 $|\lambda_{01} - \lambda_{02}|$  を以て零分散波長の偏差  $\delta \lambda$  の代替値とすることができる。

続いてステップ 1 2 6 では、偏差  $\delta \lambda$  が範囲  $\Delta \lambda_0$  よりも小さいか否かが判断される。ここでは、 $\delta \lambda \geq \Delta \lambda_0$  であるとして先のフローを説明すると、ステップ 1 2 8 では、光ファイバ F 1 が切断により光ファイバ F 1 A 及び F 1 B に二分割される。ステップ 1 2 8 の後ステップ 1 2 4 に戻り、光ファイバ F 1 A 及び F 1 B の各々について偏差  $\delta \lambda$  が測定され、各測定値についてステップ 1 2 6 で判断がなされる。ここでは、各偏差  $\delta \lambda$  が  $\Delta \lambda_0$  より小さいとすると、このフローは終了する。尚、ステップ 1 2 8 に

おける光ファイバ F 1 の切断点は任意であり、  
従って、光ファイバ F 1 A 及び F 1 B の長さは  
等しいかもしれないし異なるかもしれない。

5        上述の説明では、ステップ 1 2 4 及び 1 2 6  
が繰り返されているが、ステップ 1 2 4 及び 1  
2 6 は繰り返されないかもしれないし更に多く  
繰り返されるかもしれない。例えば、零分散波  
長の偏差が小さい光ファイバ F 2 が与えられた  
10        場合には、ステップ 1 2 6 の 1 回目の判断で条  
件が満たされ、この場合には光ファイバ F 2 は  
切断されない。一方、零分散波長が長手方向に  
大きくばらついている光ファイバ F 3 が与えら  
れると、光ファイバ F 3 は最初のステップ 1 2  
8 で光ファイバ F 3 A 及び F 3 B に分割され、  
15        2 度目の判断ステップ 1 2 6 で光ファイバ F 3  
A は条件を満足するものの光ファイバ F 3 B が  
条件を満足しない場合には、2 度目のステップ  
1 2 8 において光ファイバ F 3 B が光ファイバ  
F 3 B 1 及び F 3 B 2 に分割されてこのフロー  
20        が終了するかもしれない。この場合、オリジナ  
ルの光ファイバ F 3 から 3 つの光ファイバ F 3  
A, F 3 B 1 及び F 3 B 2 が得られており、各  
ファイバの零分散波長の偏差は許容範囲  $\Delta \lambda$ 。  
よりも小さくなっていることとなる。

25        このようにして得られた複数の光ファイバ片

(光ファイバ F 1 A, F 1 B, ...) を零分散波長の値毎に整理しておき、四光波混合のためのポンプ光の波長に実質的に等しい零分散波長を有する光ファイバ片を選んで繋ぎ合わせて所要の変換効率を得ることができる長さにするこ  
5 によって、長手方向における零分散波長のばらつきが極めて小さい非線形光学媒質を得ることができる。この非線形光学媒質を用いて位相共役器を構成することによって、広い変換帯域を得  
10 ることができる。

零分散波長  $\lambda_{0,1}$  及び  $\lambda_{0,2}$  の値がほぼ一致しているとしても、零分散波長の長手方向のバラツキが大きい光ファイバも想定される。例えば、零分散波長の長手方向の分布が光ファイバの長手方向の中央に対して対称な場合である。この  
15 ような場合には、プロセス 1 2 0 に先立って、その光ファイバを少なくとも 2 つの光ファイバ片に分割することを行って、各光ファイバ片についてプロセス 1 2 0 を適用すればよい。或いは、プロセス 1 2 0 を複数回繰り返してもよい。  
20

実験により、本発明方法により得られた非線形光学媒質を用いて構成される位相共役器が 10 G b / s の信号に対して 40 nm より広い変換帯域を有していることが明らかとなった。この位相共役器は、信号光とポンプ光との離調波  
25

5 長が 21 nm を超える範囲で、離調波長に依存  
せずに、ポンプ光パワー + 15 dBm の下で変  
換効率としてほぼ一定の値 - 10.9 dB を有  
していた。即ち、変換帯域は 40 nm よりも広  
い。その非線形光学媒質は、具体的には、75  
0 m の高度非線形分散シフトファイバ (HNL  
- DSF : highly nonlinear  
10 dispersion-shifted  
fiber) であった。HNL - DSF は各 2  
50 m の 3 つの区間をスプライシングすること  
により得られた。区間毎の平均零分散波長はそ  
れぞれ 1547.3 nm、1546.3 nm 及  
び 1548.4 nm であった。結果としての H  
NL - DSF の平均零分散波長は 1547.2  
15 nm と測定された。MFD (モードフィールド  
形) は 3.8  $\mu$ m、非線形係数  $\gamma$  は 20.4 W  
 $^{-1}$  km $^{-1}$ 、分散傾斜は 0.032 ps $^2$ /nm $^2$   
/km であった。

20 このように、非線形係数の大きな光ファイバ  
を用いると共に、本発明方法を適用して零分散  
波長の偏差を概略  $\pm 1$  nm 内に収めることによ  
って、高い変換効率で且つ広い変換帯域を有す  
る位相共役器の提供が可能になる。非線形光学  
媒質として光ファイバを有する従来の位相共役  
25 器の変換帯域が精々数 nm であることを考慮す

ると、本発明方法により得られる効果は従来技術に対して自明でなく或いは進歩性を有しており或いは臨界性を有している。特に、後述するような実施形態のように、位相共役器を用いて光ネットワーク間でWDM信号光の一括変換を行う場合には、本発明による変換帯域の拡大は極めて効果的である。

本発明による第1、第2又は第3の方法により得られた非線形光学媒質は、図6の位相共役器の光ファイバ18として採用可能である。この場合、レーザダイオード20から出力されるポンプ光の波長と光ファイバ18の零分散波長との一致性を極めて高精度に保つことができるので、広い変換帯域を得ることができる。

図21を参照すると、位相共役器の他の構成例が示されている。この位相共役器は非線形光学媒質として図6におけるのと同様な光ファイバ18が用いられている。光ファイバ18は望ましくは本発明による第1、第2又は第3の方法により提供されている。また、ポンプ光源としてレーザダイオード20が用いられている。信号光及びポンプ光を非線形光学媒質としての光ファイバ18に双方向に導波させるために、光カップラ132及び偏波ビームスプリッタ134が用いられている。光カップラ132はポート

1 3 2 A, 1 3 2 B 及び 1 3 2 C を有し、ポート 1 3 2 A 及び 1 3 2 B に供給された光をポート 1 3 2 C から出力する。ポート 1 3 2 A には  
5 入力ポート 1 3 0 が接続され、ポート 1 3 2 B は光ファイバ 1 3 3 によりポンプ光源としてのレーザダイオード 2 0 に接続される。偏波ビームスプリッタ 1 3 4 はポート 1 3 4 A, 1 3 4 B, 1 3 4 C 及び 1 3 4 D を有している。ポート 1 3 4 A 及び 1 3 4 B 間とポート 1 3 4 C 及び 1 3 4 D 間とは、第 1 の偏波面（例えば紙面に垂直な偏波面）により結合され、ポート 1 3 4 A 及び 1 3 4 C 間とポート 1 3 4 B 及び 1 3 4 D 間とは、第 1 の偏波面に垂直な第 2 の偏波面（例えば紙面に平行な偏波面）により結合されている。  
10 15 ポート 1 3 4 A は光ファイバ 1 3 5 によりポート 1 3 2 C に接続され、ポート 1 3 4 B 及び 1 3 4 C 間には非線形光学媒質としての光ファイバ 1 8 が接続され、ポート 1 3 4 D は出力ポート 1 3 6 に接続されている。光ファイバ 1 8 の途中には、 $1/4$  波長板及び  $1/2$  波長板等を用いて通常通り構成される偏波制御器 1 3 8 が設けられており、この偏波制御器 1 3 8 は、光ファイバ 1 8 の入力及び出力の偏波状態が一致するような制御を行う。

25 入力ポート 1 3 0 からの信号光及びレーザダ

イオード 20 からのポンプ光は、光カプラ 132 を介して偏波ビームスプリッタ 134 のポート 134 A に供給される。供給された信号光及びポンプ光は、偏波ビームスプリッタ 134 により第 1 及び第 2 の偏波面をそれぞれ有する第 1 及び第 2 の偏波成分に分離される。第 1 及び第 2 の偏波成分は、光ファイバ 18 を互いに逆方向に伝搬する。このとき、光ファイバ 18 内においては、四光波混合によって、互いに逆方向に伝搬する 2 つの位相共役成分が発生する。即ち、第 1 の偏波面を有する位相共役成分はポート 134 B からポート 134 C に向けて伝搬し、第 2 の偏波面を有する位相共役成分はポート 134 C からポート 134 B に向けて伝搬する。偏波ビームスプリッタ 134 に供給された第 1 及び第 2 の位相共役成分は偏波合成され、その結果としての位相共役光がポート 134 D から出力ポート 136 に向けて出力される。

レーザダイオード 20 から出力されるポンプ光の偏波面は、偏波ビームスプリッタ 134 で分離される第 1 及び第 2 の偏波成分への、ポンプ光の分配比が 1 : 1 になるように設定されるのが望ましい。例えば、偏波ビームスプリッタ 134 のポート 134 A に供給されるポンプ光の偏波面が第 1 及び第 2 の偏波面に対してそれ

5        ぞれほぼ  $45^\circ$  傾斜するように、レーザダイオード 20 が設定される。こうしておく、光ファイバ 18 に互いに逆方向に導波される信号光の直交二偏波成分に対して、ポンプ光の直交二偏波成分がそれぞれ一致した偏波面で以て作用するので、入力ポート 130 における信号光の偏波状態の変動に関わらず一定強度の位相共役光を得ることができる。即ち、発生効率が入力信号光の偏波状態に依存しない位相共役器の提供が可能になる。

10        偏波ビームスプリッタ 134 のポート 134 A に供給されるポンプ光の偏波面が第 1 及び第 2 の偏波面に対してそれぞれほぼ  $45^\circ$  傾斜するようにするためには、実質的に直線偏波としてレーザダイオード 20 から出力されるポンプ光の偏波面を維持してこれをポート 134 A に供給することが要求される。そのためには、光ファイバ 133 及び 135 の各々として偏波保持ファイバ (PMF) を用いることができる。

15        PMF は径方向に主軸を有している。PMF は、主軸に平行な偏波面を有する偏波成分或いは主軸に垂直な偏波面を有する偏波成分の偏波状態を維持してこれを伝搬させる。従って、ポート 134 A においてポンプ光の偏波面を第 1 及び第 2 の偏波面に対して  $45^\circ$  傾斜させるために

20       

25



は、光ファイバ 1 3 5 として用いられる P M F  
の主軸を第 1 及び第 2 の偏波面に対して  $45^\circ$   
傾斜させればよい。

5           しかしながら、光ファイバ 1 3 5 として P M  
F が用いられる場合、直線偏波に必ずしも限定  
されない信号光もこの P M F を通ることになり、  
P M F を通る信号光の直交二偏波モード間の遅  
延により偏波分散が生じるかもしれない。この  
10          偏波分散に対処するためには、光ファイバ 1 3  
5 として用いられる P M F を、長さが実質的に  
等しい第 1 及び第 2 の P M F をスプライス接続  
することにより提供すればよい。当該スプライ  
ス接続点においては、第 1 の P M F の第 1 の主  
軸と第 2 の P M F の第 2 の主軸とは互いに直交  
15          するようにされ、これにより偏波モード間の遅  
延が相殺されて偏波分散が解消される。例えば、  
第 1 の主軸が第 1 の偏波面に対して時計回り方  
向に  $45^\circ$  傾斜している場合には、第 2 の主軸  
は第 1 の偏波面に対して反時計回り方向に  $45^\circ$   
20          傾斜するようにされる。

尚、前述したように、光ファイバ 1 8 の非線  
形係数が十分大きくその長さが偏波面保存能力  
を有している程度に短い場合には、偏波制御器  
1 3 8 を省略することができる。

25          このように、本発明によると、発生効率が入

力信号光の偏波状態に依存せず、且つ、偏波分散が小さい位相共役器が提供される。この位相共役器は、偏波ビームスプリッタと、非線形光学媒質と、ポンプ光源と、カップリング手段とを備えている。偏波ビームスプリッタは第1乃至第4のポートを有する。第1及び第2のポート間並びに第3及び第4のポート間は第1の偏波面により結合される。第1及び第3のポート間並びに第2及び第4のポート間は第1の偏波面に垂直な第2の偏波面により結合される。非線形光学媒質は第2及び第3のポート間に動作的に接続される。ポンプ光源はポンプ光を出力する。カップリング手段は、信号光及びポンプ光をそれぞれ受ける第1及び第2の入力ポート並びに出力ポートを有する光カプラと、出力ポート及び偏波ビームスプリッタの第1のポート間に動作的に接続される偏波保持ファイバとを含む。カップリング手段は、信号光及びポンプ光を偏波ビームスプリッタの第1のポートに供給する。

偏波保持ファイバは、偏波ビームスプリッタの第1のポートにおけるポンプ光の偏波面が第1及び第2の偏波面に対して実質的に45°傾斜するように設定される主軸を有している。

望ましくは、偏波保持ファイバは、スプライ

ス接続された第 1 及び第 2 の偏波保持ファイバ  
からなり、これらは互いに直交する第 1 及び第  
2 の主軸を有している。

5 図 2 2 は、広い変換帯域を有する位相共役器  
による W D M 信号光の一括変換を説明するた  
めの図である。W D M 信号光は、異なる波長  $\lambda_1$   
、  $\lambda_2$  , ... ,  $\lambda_N$  を有する N チャンネルの光信号  
を波長分割多重 (W D M) することにより得ら  
れる。ここでは、 $\lambda_1$  が最短波長であり、 $\lambda_N$   
10 が最長波長であるとする。ポンプ光の波長  $\lambda_p$   
は例えば  $\lambda_1$  よりも短く設定される。ポンプ光  
を用いた非縮退四光波混合によって、W D M 信  
号光は変換光に変換される。変換光は、異なる  
波長  $\lambda_1'$  ,  $\lambda_2'$  , ... ,  $\lambda_N'$  を有する N チ  
15 チャンネルの変換光信号からなる。W D M 信号光に  
おける各チャンネルの光信号と変換光における各  
変換光信号の配置はポンプ光の波長  $\lambda_p$  に対し  
て対称である。

20 非線形光学媒質として光ファイバを用いた四  
光波混合においては、変換帯域がほぼ平坦であ  
るため、各チャンネルの光信号に対してほぼ同じ  
変換効率で波長変換及び位相共役変換を行うこ  
とができる。従って、各チャンネルに対して伝送  
路の波長分散と非線形効果とによる波形歪みを  
25 補償可能であり、長距離大容量の伝送が可能で

ある。図 2 2 においては、長波長帯から短波長帯への変換を示しているが、光ファイバによる変換帯域は零分散波長に関して対称であるから、短波長帯から長波長帯への変換も同様に可能であることは言うまでもない。

図 2 3 は、波長変換及び位相共役変換が適用されるシステムの実施形態を示す図である。各々 WDM が適用される複数の光ファイバネットワーク NW 1, NW 2 及び NW 3 は、光ファイバ伝送路 1 4 0 及びノード 1 4 2 によって接続されている。ネットワーク NW 1 及び NW 2 間における変換を行うために、光ファイバ伝送路 1 4 0 の途中には位相共役器 PC 1 1 が設けられ、ネットワーク NW 2 及び NW 3 間の変換を行うために、光ファイバ伝送路 1 4 0 の途中には位相共役器 2 3 が設けられている。ネットワーク NW 1, NW 2 及び NW 3 においては、それぞれ、異なる波長帯  $\lambda_{11}$ ,  $\lambda_{21}$ ,  $\lambda_{31}$  の WDM 伝送が行われているものとする。位相共役器 PC 1 1 は波長帯  $\lambda_{11}$  及び  $\lambda_{21}$  間で波長変換及び位相共役変換を行い、位相共役器 PC 2 3 は波長帯  $\lambda_{21}$  及び  $\lambda_{31}$  間で波長変換及び位相共役変換を行う。光ファイバ伝送路 1 4 0 の途中には、波長分散及び非線形効果による波形歪みが本発明に従って最も改善される位置が幾つかで



ている。最近、50 nmを超えるような広帯域  
でしかもWDMを指向した利得の平坦性に優れた  
EDFAが開発されている。将来的に更に帯  
域が拡大し、60～80 nm程度の広帯域なE  
5 D F Aが開発されよう。このようなE D F Aの  
広帯域化は、WDMのチャネル数（伝送容量）  
を大きくするのに役立っているのは勿論である  
が、図23に示されるようなネットワーク間伝  
送等において新しい概念の導入を可能とする。

10 例えば、図24に示されるように、図23の  
光ファイバネットワークNW1及びNW2の波  
長帯が設定されている場合、光ファイバネット  
ワークNW1及びNW2間において本発明による  
有効な伝送が可能である。図24において、  
15 符号144は光増幅器（例えばEDFA）の比  
較的平坦な利得帯域を示している。

このようにネットワーク毎に用いる波長帯が  
異なることの理由の1つは、ネットワーク毎に  
用いる伝送路としての光ファイバが異なる処に  
20 ある。既に実用化されている光ファイバとして  
は、1.3  $\mu$ m零分散シングルモードファイバ  
（所謂標準SMF）と、1.55  $\mu$ m分散シフ  
トファイバ（DSF）とがある。一方、最近に  
おけるEDFAの開発により、特に高速長距離  
25 伝送の中心は1.55  $\mu$ m帯となってきた。

標準 S M F が  $+16 \sim +20 \text{ ps/nm/km}$  程度の大きな異常分散値を示すのに対して、D S F では  $\pm 1 \sim 2 \text{ ps/nm/km}$  程度の小さな分散値に抑えることができるので、 $1.55 \mu\text{m}$  帯における高速長距離伝送に対しては D S F の方が有利である。しかし、既に多くの標準 S M F が敷設されており、これを伝送路として用いなければならないネットワークも多い。こうしたネットワークから D S F を用いたネットワークへの接続においては、D S F の最適な分散値となる波長帯への波長変換が必要になり、従って、このような場合に本発明は有効である。

一方、各々 D S F を用いたネットワーク間の接続においても本発明は有効である。その理由は、W D M においては必ずしも分散が小さい方が有利である訳ではないからである。比較的高速の W D M においては、所要の信号対雑音比

( S N R ) を確保するために、各チャネルのパワーレベルはかなり高く設定する必要がある。

この場合、伝送路として使用される光ファイバの分散が小さいと、四光波混合により隣接チャネル間のクロストークが発生し、伝送特性が劣化する。この影響を避けるため、最近では、零分散波長を信号帯域から大きくシフトさせた比較的大きな分散のファイバ (Nonzero dispersi

on-shifted fiber) を用いることがある。このように伝送路として使用される光ファイバのパラエティーが豊富になった分、いろいろな波長帯でのネットワーク構成が可能となり、こうしたネットワーク間を接続する場合において本発明のような広帯域な波長変換及び位相共役変換が有効となる。

最近では、光ファイバと共に E D F A のパラエティーも豊富になっているが、何といたっても一般的な E D F A は 1.53  $\mu$ m 帯及び 1.55  $\mu$ m 帯に利得ピークを有するタイプである。このうち前者はブルーバンド、後者はレッドバンドと称されている。

図 2 5 は、図 2 3 における波長帯の他の設定例を示す図である。ここでは、光ファイバネットワーク NW 1 の波長帯は符号 1 4 6 で示される E D F A のレッドバンドに含まれ、光ファイバネットワーク NW 2 の波長帯は符号 1 4 8 で示される E D F A のブルーバンドに含まれている。このような設定によると、光ファイバ伝送路 1 4 0 或いは各ネットワークがインライン型の E D F A を含む場合に、レッドバンド及び位相共役変換を容易に行うことができる。

図 2 6 は、図 2 3 における分散配置の例を示す図である。D<sub>1</sub> 及び D<sub>2</sub> (各々単位は p s /



n m / k m) は、それぞれ、光ファイバネットワーク NW 1 及び NW 2 における分散を表している。図では、各ネットワーク内で正常分散ファイバを用いて WDM を行う例が示されている。

5 図 2 2 に示されるように、波長変換によりチャンネル配置が反転するので、各チャンネルに対する変換前後の分散の影響が異なることが予想されるが、中心付近のチャンネルに対して分散の影響がほぼ同じになるようにするとともに、各ネットワーク内で分散補償を行うことにより、この

10 問題は解決可能である。尚、各ネットワーク内の分散は正常分散であってもよいし異常分散であってもよい。

以上のように、本発明によると、異なる波長

15 を有する複数の光信号を波長分割多重 (WDM) してなる WDM 信号光のための複数の光ファイバネットワークと、これらを結ぶための少なくとも 1 つの変換器とを備えた光ファイバ通信システムが提供される。変換器が、複数の光

20 信号の波長変換及び位相共役変換を一括に行うことによって、柔軟性に富んだ長距離大容量のシステムの構築が容易になる。

図 2 7 は、図 6 に示される位相共役器の改良例を示す図である。ここでは、第 1 及び第 2 の

25 光帯域阻止フィルタ 1 5 2 及び 1 5 4 と光帯域

通過フィルタ 1 5 6 とが付加的に設けられている。信号光（入力ビーム）は第 1 の帯域阻止フィルタ 1 5 2 を通って光カプラ 2 2 のポート 2 2 A に供給され、非線形光学媒質としての光ファイバ 1 8 内で発生した位相共役光は第 2 の光帯域阻止フィルタ 1 5 4 及び光帯域通過フィルタ 1 5 6 をこの順に通って出力される。フィルタ 1 5 4 及び 1 5 6 の接続順序は逆でもよい。

図 2 8 A を参照すると、図 2 7 に示される光フィルタ 1 5 2, 1 5 4 及び 1 5 6 の各特性が示されている。図 2 8 A において縦軸は透過率、横軸は波長を示している。第 1 の光帯域阻止フィルタ 1 5 2 は、符号 1 5 8 で示されるように、光ファイバ 1 8 内で発生する位相共役光の波長  $\lambda_c$  の波長を含む阻止帯域を有している。即ち、波長  $\lambda_c$  の近傍の領域におけるフィルタ 1 5 2 の透過率は実質的に 0 % であり、それ以外の領域における同透過率は実質的に 1 0 0 % である。第 2 の光帯域阻止フィルタ 1 5 4 は、符号 1 6 0 で示されるように、レーザダイオード 2 0 から出力されるポンプ光の波長  $\lambda_p$  を含む比較的狭い阻止帯域を有している。即ち、波長  $\lambda_p$  の近傍の領域におけるフィルタ 1 5 4 の透過率は実質的に 0 % であり、それ以外の領域における同透過率は実質的に 1 0 0 % である。光帯域通

過フィルタ 156 は、符号 162 で示されるように、光ファイバ 18 内で発生する位相共役光の波長  $\lambda_c$  の波長を含む通過帯域を有している。即ち、波長  $\lambda_c$  の近傍の領域におけるフィルタ 156 の透過率は実質的に 100% であり、それ以外の領域における同透過率は実質的に 0% である。

図 28B ~ 28D を参照すると、図 27 の位相共役器の各位置において観測される光スペクトルが示されている。図 28B は、第 1 の光帯域阻止フィルタ 152 の出力のスペクトルを示している。ここでは、信号光は、ASE 光に重畳された WDM 信号光により与えられている。第 1 の光帯域阻止フィルタ 152 が用いられていることにより、符号 164 で示されるように、ASE スペクトルには雑音電力が極めて小さい窓が形成される。図 28C は光ファイバ 18 の出力のスペクトルを示している。光ファイバ 18 内における非縮退四光波混合の結果位相共役変換及び波長変換が行われ、WDM 信号光は変換光に変換される。WDM 信号光及び変換光間における各チャンネルの波長配置は、前述したように、ポンプ光の波長  $\lambda_p$  に対して対称である。変換光の各チャンネルの波長は窓 164 内に含まれる。図 28D は光帯域通過フィルタ 156 の

出力のスペクトルを示している。第 2 の光帯域  
阻止フィルタ 1 5 4 が狭い阻止帯域を有してい  
ることにより、ポンプ光のパワーは効果的に抑  
5 圧されている。また、光帯域通過フィルタ 1 5  
6 を採用していることにより、窓 1 6 4 の近傍  
における A S E 光が効果的に抑圧されている。

図 2 7 の実施形態では、ポンプ光を除去する  
ための光帯域阻止フィルタ 1 5 4 を光ファイバ  
1 8 の出力側に設けているので、受信局或いは  
10 光伝送路の下流側に配置される光デバイスに対  
するポンプ光の影響が低減され、位相共役光の  
処理（抽出及び増幅等）を容易に行うことがで  
きる。例えば、位相共役器の下流側に光増幅器  
15 が設けられている場合、パワーの大きいポンプ  
光がその光増幅器に供給されると光増幅器が飽  
和してしまい、所要の利得を得ることができな  
い可能性があるのであるが、図 2 7 のような構  
成を採用することによって、このような問題を  
解決することができる。

特に、図 2 7 の実施形態では、光帯域阻止フ  
20 イルタ 1 5 4 及び光帯域通過フィルタ 1 5 6 が  
光ファイバ 1 8 の出力側にカスケード接続され  
ているので、ポンプ光の抑圧を効果的に行うこ  
とができ、従って、ポンプ光のパワーを大きく  
25 して変換効率を効果的に高めることができる。

例えば、光ファイバ 1 8 の出力側に光帯域通過  
フィルタ 1 5 6 だけを設けた場合、フィルタ 1  
5 6 の製造技術上ポンプ光の除去能力が低いか  
もしれないことを考慮すると、フィルタ 1 5 4  
5 及び 1 5 6 の組み合わせは効果的である。その  
意味において、図 2 7 の実施形態により得られ  
る、ポンプ光及び／又は信号光を効果的に除去  
し得るという効果は、従来技術に対して自明で  
はなく或いは進歩性を有しており或いは臨界性  
10 を有している。図 2 7 の実施形態において、光  
ファイバ 1 8 の入力側に光帯域阻止フィルタ 1  
5 2 を設けているのは、発生させられるべき位  
相共役光の波長  $\lambda_c$  の近傍において A S E 雑音  
を予め除去するためである。その結果、信号対  
15 雑音比 ( S N R ) の劣化を防止することができる。  
図 2 7 は図 6 に示される位相共役器の改良  
を示しているが、同様の改良を図 2 1 に示さ  
れる位相共役器に施してもよい。この場合、第  
1 の光帯域阻止フィルタ 1 5 2 は入力ポート 1  
20 3 0 と光カプラ 1 3 2 のポート 1 3 2 A との間  
に設けられ、第 2 の光帯域阻止フィルタ 1 5 4  
及び光帯域通過フィルタ 1 5 6 は偏波ビームス  
プリッタ 1 3 4 のポート 1 3 4 D と出力ポート  
1 3 6 との間に設けられる。

25 以上のように、本発明によると、位相共役光

を発生させるための装置として、S N Rの劣化  
が少なく且つ下流側への影響が小さい位相共役  
器が提供される。この位相共役器は、非線形光  
学媒質と、ポンプ光源と、光帯域阻止フィルタ  
とを備えている。非線形光学媒質は第1端及び  
第2端を有しており、第1端には信号光が供給  
される。ポンプ光源は第1端及び第2端の少な  
くとも何れかからポンプ光を非線形光学媒質に  
供給する。光帯域阻止フィルタは非線形光学媒  
質の第2端に動作的に接続される。光帯域阻止  
フィルタはポンプ光の波長を含む阻止帯域を有  
している。

本発明を実施する場合、各光フィルタとして  
はファイバグレーティングを用いることができ  
る。光学媒質（例えばガラス）の屈折率が光照射  
によって恒久的に変化する場合、その媒質は  
感光性であると言われる。この性質を用いるこ  
とにより、光ファイバのコアにファイバグレー  
ティングを作製することができる。このような  
ファイバグレーティングの特徴は、グレーティ  
ングピッチとファイバモードの有効屈折率とに  
よって決定される共振波長近傍の狭い帯域で光  
をブラッグ反射させることである。ファイバグ  
レーティングは、例えば、フェイズマスクを用  
いて波長248nm又は193nmで発振する

エキシマレーザを照射することによって作製することができる。

例えば、ファイバグレーティングを用いて図  
2 7 に示される光帯域阻止フィルタ 1 5 2 及び  
1 5 4 の各々を作製することによって、正確で  
且つ狭い阻止帯域を得ることができる。

#### 産業上の利用可能性

以上のように、本発明によると、位相共役器  
を用いて波長分散及び非線形性を効果的に補償  
することができるので、長距離大容量の光ファ  
イバ通信システムの提供が可能になる。また、  
そのようなシステムに使用するのに適した広い  
変換帯域で高い変換効率の位相共役器の提供が  
可能になる。

## 請 求 の 範 囲

1. 信号ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第1端及び第2端を有する第1の光ファイバと、

上記第2端に動作的に接続され上記信号ビームを第1の位相共役ビームに変換して出力する第1の位相共役器と、

上記第1の位相共役ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第3端及び第4端を有する第2の光ファイバと、

上記第4端に動作的に接続され上記第1の位相共役ビームを第2の位相共役ビームに変換して出力する第2の位相共役器と、

上記第2の位相共役ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第5端及び第6端を有する第3の光ファイバとを備え、

上記第2の光ファイバは上記第3端及びシステム中間点の間の第1の部分と該システム中間点及び上記第4端の間の第2の部分とからなり、

上記第1の光ファイバの波長分散の平均値及び長さの積は上記第1の部分の波長分散の平均値及び長さの積に実質的に一致し、

上記第2の部分の波長分散の平均値及び長さの積は上記第3の光ファイバの波長分散の平均



値及び長さの積に実質的に一致する光ファイバ通信システム。

2. 請求の範囲第1項に記載のシステムであって、

5 上記第1の光ファイバにおける光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第1の光ファイバの長さの積は上記第1の部分における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第1の部分の長さの積に実質的に一致し、

10 上記第2の部分における光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第2の部分の長さの積は上記第3の光ファイバにおける光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第3の光ファイバの長さの積に実質的に一致するシステム。

15 3. 請求の範囲第1項に記載のシステムであって、

20 上記第1の光ファイバ、上記第2の光ファイバ及び上記第3の光ファイバを含む光路上に設けられる複数の光増幅器を更に備えたシステム。

4. 請求の範囲第3項に記載のシステムであって、

25 上記複数の光増幅器の隣り合う各2つの光増幅器の間の距離は上記光路の非線形長よりも短

いシステム。

5. 請求の範囲第1項に記載のシステムであって、

5 上記システム中間点は上記第1の位相共役ビームの波形歪みが最も小さくなる位置として定義されるシステム。

6. 請求の範囲第1項に記載のシステムであって、

10 上記第1の光ファイバ及び上記第1の部分が仮想的にそれぞれ同数の区間に分割されたときに、上記第1の位相共役器から数えて対応する2つの区間の波長分散の平均値及び区間長の積は実質的に一致するとともに、当該2つの区間における光パワーの平均値、非線形係数の平均値及び区間長の積は実質的に一致し、

15 上記第2の部分及び上記第3の光ファイバが仮想的にそれぞれ同数の区間に分割されたときに、上記第2の位相共役器から数えて対応する2つの区間の波長分散の平均値及び区間長の積は実質的に一致するとともに、当該2つの区間における光パワーの平均値、非線形係数の平均値及び区間長の積は実質的に一致する光ファイバ通信システム。

20 7. 請求の範囲第1項に記載のシステムであって、

25

上記第 1 の位相共役器からの波長分散の累積  
値が等しい上記第 1 の光ファイバ及び上記第 1  
の部分上の 2 点の各々における光パワー及び非  
線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致  
し、

5 上記第 2 の位相共役器からの波長分散の累積  
値が等しい上記第 2 の部分及び上記第 3 の光フ  
ァイバ上の 2 点の各々における光パワー及び非  
線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致  
するシステム。

10 8. 請求の範囲第 1 項に記載のシステムで  
あって、

上記第 1 の位相共役器からの光パワー及び非  
線形係数の積の累積値が等しい上記第 1 の光フ  
ァイバ及び上記第 1 の部分上の 2 点の各々にお  
ける光パワー及び非線形係数の積と波長分散と  
の比が実質的に一致し、

15 上記第 2 の位相共役器からの光パワー及び非  
線形係数の積の累積値が等しい上記第 2 の部分  
及び上記第 3 の光ファイバ上の 2 点の各々にお  
ける光パワー及び非線形係数の積と波長分散と  
の比が実質的に一致するシステム。

20 9. 請求の範囲第 1 項に記載のシステム  
であって、

25 上記第 1 及び第 2 の位相共役器の各々は、

上記第 2 の光ファイバに動作的に接続される  
2 次又は 3 次の非線形光学媒質と、

該非線形光学媒質をポンピングする手段とを  
備えているシステム。

5            1 0 .    請求の範囲第 9 項に記載のシステムであって、

上記ポンピングする手段はポンプ光を上記非  
線形光学媒質に供給する手段を含み、

10            上記非線形光学媒質は上記ポンプ光の波長に  
実質的に等しい零分散波長を有する光ファイバ  
からなるシステム。

            1 1 .    請求の範囲第 1 項に記載のシステムであって、

15            上記信号ビームを上記第 1 の光ファイバに供給する光送信機と、

            上記第 3 の光ファイバからの上記第 2 の位相  
共役ビームを受ける光受信機とを更に備えたシステム。

20            1 2 .    請求の範囲第 1 1 項に記載のシステムであって、

            上記光送信機、上記第 1 の光ファイバ及び上記第 1 の位相共役器は第 1 の端局に含まれ、

            上記第 2 の位相共役器、上記第 3 の光ファイバ及び上記光受信機は第 2 の端局に含まれ、

25            上記第 1 及び第 2 の端局の間に上記第 2 の光

ファイバが敷設されるシステム。

1 3 . 請求の範囲第 1 項に記載のシステムであって、

5 上記第 2 の光ファイバの入力端若しくは出力端又は途中に設けられ上記第 1 の位相共役ビームを増幅する光増幅器を更に備え、これにより上記第 2 の光ファイバの損失が補償されるシステム。

10 1 4 . 請求の範囲第 1 3 項に記載のシステムであって、

上記第 2 の光ファイバにおける上記システム中間点の近傍に設けられ上記第 1 の位相共役ビームの波長を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタを更に備え、これにより上記光増幅器で生じた雑音が除去されるシステム。

15 1 5 . 請求の範囲第 1 3 項に記載のシステムであって、

上記光増幅器は複数の光増幅器からなるシステム。

20 1 6 . 請求の範囲第 1 5 項に記載のシステムであって、

上記複数の光増幅器の隣り合う各 2 つの光増幅器の間の距離は上記第 2 の光ファイバの非線形長よりも短く設定されるシステム。

25 1 7 . 請求の範囲第 1 項に記載のシステム

ムであって、

上記第 2 の光ファイバにおける上記システム  
中間点の近傍に設けられ上記第 1 の位相共役ビ  
ームを複数の分岐ビームに分岐する分岐ユニッ  
トを更に備え、

5 上記第 2 の部分、上記第 2 の位相共役器及び  
上記第 3 の光ファイバは上記複数の分岐ビーム  
に対応してそれぞれ複数あり、

10 上記複数の分岐ビームの各々は上記複数の第  
2 の部分の各々に供給されるシステム。

1 8 . 請求の範囲第 1 7 項に記載のシス  
テムであって、

15 上記分岐ユニットに動作的に接続され上記第  
1 の位相共役ビームの伝送特性をモニタリング  
する手段を更に備えたシステム。

1 9 . 請求の範囲第 1 項に記載のシステ  
ムであって、

20 上記第 1 の光ファイバは上記信号ビームのパ  
ワ－の減少に伴って減少する波長分散を有する  
分散漸減ファイバを含み、これにより上記第 1  
の光ファイバにおける光パワー及び非線形係数  
の積と波長分散との比がほぼ一定になるシステ  
ム。

25 2 0 . 請求の範囲第 1 9 項に記載のシス  
テムであって、

上記分散漸減ファイバは異なる波長分散を有する複数の分散シフトファイバを縦続接続してなるシステム。

5            2 1 .    請求の範囲第 1 9 項に記載のシステムであって、

上記第 2 の光ファイバにおける光パワーをほぼ一定にするための複数の光増幅器を更に備えたシステム。

10            2 2 .    請求の範囲第 2 1 項に記載のシステムであって、

15            上記第 3 の光ファイバは上記第 2 の位相共役ビームのパワーの減少に伴って減少する波長分散を有する第 2 の分散漸減ファイバを含み、これにより上記第 3 の光ファイバにおける光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比がほぼ一定になるシステム。

             2 3 .    請求の範囲第 1 9 項に記載のシステムであって、

20            上記分散漸減ファイバは複数あり、これらの間に設けられる少なくとも 1 つの光増幅器を更に備えたシステム。

             2 4 .    請求の範囲第 1 項に記載のシステムであって、

25            上記信号ビームは波長が異なる複数の信号ビームを波長分割多重 (WDM) してなる WDM

信号ビームであり、

上記第 1 の光ファイバは上記複数の信号ビームに対応して複数あるシステム。

2 5 . 請求の範囲第 2 4 項に記載のシステムであって、

上記第 2 の位相共役器に動作的に接続され、  
上記第 2 の位相共役ビームを上記複数の信号ビームに対応する複数の位相共役ビームに分ける  
光デマルチプレクサを更に備え、

上記第 3 の光ファイバは上記複数の位相共役ビームに対応して複数あるシステム。

2 6 . 請求の範囲第 1 項に記載のシステムであって、

上記第 1 、第 2 及び第 3 の光ファイバの少なくとも何れかの入力端若しくは出力端又は途中に設けられ上記第 1 、第 2 及び第 3 の光ファイバの各々の波長分散と逆符号の波長分散を与える少なくとも一つの分散補償器を更に備えたシステム。

2 7 . 請求の範囲第 2 6 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器は上記第 2 の光ファイバよりも単位長さ当たりの波長分散の絶対値が大きい分散補償ファイバからなるシステム。

2 8 . 請求の範囲第 2 6 項に記載のシス



テムであって、

上記第 1、第 2 及び第 3 の光ファイバの各々は正常分散を与え、

5        上記分散補償器は 1.3  $\mu$ m 零分散ファイバからなるシステム。

29.        請求の範囲第 26 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器はファイバグレーティングからなるシステム。

10        30.        請求の範囲第 1 項に記載のシステムであって、

15        上記第 1 の光ファイバ、上記第 1 の位相共役器、上記第 2 の光ファイバ、上記第 2 の位相共役器及び上記第 3 の光ファイバにそれぞれ相当する光学要素を含む 1 つ又はそれよりも多い光学ユニットを更に備え、

該光学ユニットは上記第 3 の光ファイバに動作的に接続されるシステム。

20        31.        信号ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第 1 端及び第 2 端を有する第 1 の光ファイバと、

上記第 2 端に動作的に接続され上記信号ビームを位相共役ビームに変換して出力する位相共役器と、

25        上記位相共役ビームの入力端及び出力端にそ

れぞれ相当する第 3 端及び第 4 端を有する第 2  
の光ファイバと、

5 上記第 1 の光ファイバ、上記位相共役器及び  
上記第 2 の光ファイバを含む光路上に設けられ  
上記第 1 及び第 2 の光ファイバの各々の波長分  
散と逆符号の波長分散を与える少なくとも 1 つ  
の分散補償器とを備え、

10 上記第 1 の光ファイバの波長分散の平均値及  
び長さの積は上記第 2 の光ファイバの波長分散  
の平均値及び長さの積に実質的に一致する光フ  
ァイバ通信システム。

3 2 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシス  
テムであって、

15 上記第 1 の光ファイバにおける光パワーの平  
均値及び非線形係数の平均値並びに上記第 1 の  
光ファイバの長さの積は上記第 2 の光ファイバ  
における光パワーの平均値及び非線形係数の平  
均値並びに上記第 2 の光ファイバの長さの積に  
実質的に一致するシステム。

20 3 3 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシス  
テムであって、

上記第 1 の光ファイバ及び上記第 2 の光フ  
ァイバを含む光路上に設けられる複数の光増幅  
器を更に備えたシステム。

25 3 4 . 請求の範囲第 3 3 項に記載のシス

テムであって、

上記複数の光増幅器の隣り合う各 2 つの光増幅器の間の距離は上記光路の非線形長よりも短いシステム。

5            3 5 .    請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

10            上記第 1 及び第 2 の光ファイバが仮想的にそれぞれ同数の区間に分割されたときに、上記位相共役器から数えて対応する 2 つの区間の波長分散の平均値及び区間長の積は実質的に一致すると共に、当該 2 つの区間における光パワーの平均値、非線形係数の平均値及び区間長の積は実質的に一致する光ファイバ通信システム。

15            3 6 .    請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記位相共役器からの波長分散の累積値が等しい上記第 1 及び第 2 の光ファイバ上の 2 点の各々における光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致するシステム。

20            3 7 .    請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

25            上記位相共役器からの光パワー及び非線形係数の積の累積値が等しい上記第 1 及び第 2 の光ファイバ上の 2 点の各々における光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比が実質的に一

致するシステム。

3 8 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器は上記第 1 の光ファイバの途中に設けられるシステム。

3 9 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器は上記第 2 の光ファイバの途中に設けられるシステム。

4 0 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記第 1 及び第 2 の光ファイバの各々はシングルモードファイバであるシステム。

4 1 . 請求の範囲第 4 0 項に記載のシステムであって、

上記シングルモードファイバは波長 1 . 5 5  $\mu$  m 帯で異常分散を与えるシステム。

4 2 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器はファイバグレーティングからなるシステム。

4 3 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

上記分散補償器の波長分散の値は上記第 2 の光ファイバの上記第 4 端における上記位相共役

ビームの波形歪みが最も小さくなるように設定されるシステム。

4 4 . 請求の範囲第 3 1 項に記載のシステムであって、

5 上記第 1 及び第 2 の光ファイバの各々は正常分散を与え、

上記分散補償器は 1 . 3  $\mu$  m 零分散ファイバからなるシステム。

10 4 5 . 信号ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第 1 端及び第 2 端を有する第 1 の光ファイバと、

上記第 2 端に動作的に接続され上記信号ビームを位相共役ビームに変換して出力する位相共役器と、

15 上記位相共役ビームの入力端及び出力端にそれぞれ相当する第 3 端及び第 4 端を有する第 2 の光ファイバとを備え、

20 上記第 1 の光ファイバの波長分散の平均値及び長さの積は上記第 2 の光ファイバの波長分散の平均値及び長さの積に実質的に一致し、

上記信号ビームは互いに異なる波長を有する複数の信号ビームを含む波長分割多重信号ビームであり、

25 上記第 1 及び第 2 の光ファイバの 2 次分散 (分散傾斜) は両方とも実質的に零であるか或

いは互いに逆の符号を有している光ファイバ通信システム。

4 6 . 請求の範囲第 4 5 項に記載のシステムであって、

5 上記第 1 の光ファイバにおける光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第 1 の光ファイバの長さの積は上記第 2 の光ファイバにおける光パワーの平均値及び非線形係数の平均値並びに上記第 2 の光ファイバの長さの積に実質的に一致する光ファイバ通信システム。

10 4 7 . 請求の範囲第 4 5 項に記載のシステムであって、

15 上記第 1 の光ファイバ及び上記第 2 の光ファイバを含む光路上に設けられる複数の光増幅器を更に備えたシステム。

4 8 . 請求の範囲第 4 7 項に記載のシステムであって、

20 上記複数の光増幅器の隣り合う各 2 つの光増幅器の間の距離は上記光路の非線形長よりも短いシステム。

4 9 . 請求の範囲第 4 5 項に記載のシステムであって、

25 上記第 1 及び第 2 の光ファイバが仮想的にそれぞれ同数の区間に分割されたときに、上記位相共役器から数えて対応する 2 つの区間の波長

分散の平均値及び区間長の積は実質的に一致すると共に、当該 2 つの区間における光パワーの平均値、非線形係数の平均値及び区間長の積は実質的に一致する光ファイバ通信システム。

5            5 0 .    請求の範囲第 4 5 項に記載のシステムであって、

10            上記位相共役器からの波長分散の累積値が等しい上位第 1 及び第 2 の光ファイバ上の 2 点の各々における光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致するシステム。

            5 1 .    請求の範囲第 4 5 項に記載のシステムであって、

15            上記位相共役器からの光パワー及び非線形係数の積の累積値が等しい上記第 1 及び第 2 の光ファイバ上の 2 点の各々における光パワー及び非線形係数の積と波長分散との比が実質的に一致するシステム。

20            5 2 .    位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための方法であって、

            ( a )    光ファイバを切断して複数の区間に分割するステップと、

25            ( b )    上記非線形光学媒質を用いた非縮退四光波混合における変換帯域が最大になるように上記複数の区間を並べ替えて繋ぎ合わせるこ

とにより上記非線形光学媒質を得るステップとを含む方法。

5 3. 請求の範囲第52項に記載の方法であって、

5 上記ステップ(b)は上記複数の区間の各々の分散値を測定するステップを含み、

10 上記非線形光学媒質にポンプ光を入力するときの入力端に近い側に比較的分散値の小さい区間が配置されるように上記複数の区間が並べ替えられる方法。

5 4. 請求の範囲第52項に記載の方法であって、

上記複数の区間の少なくとも一部は分散値の正負が交互になるように繋ぎ合わされる方法。

15 5 5. 請求の範囲第52項に記載の方法により製造された装置。

5 6. 位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための方法であって、

20 (a) 光ファイバを切断して複数の区間に分割するステップと、

(b) 上記複数の区間の各々の分散値を測定するステップと、

25 (c) 上記非線形光学媒質を用いた非縮退四光波混合における所要の変換帯域を得るのに



十分小さい分散値を有する区間だけを選んで繋ぎ合わせるにより上記非線形光学媒質を得るステップとを含む方法。

5 57. 請求の範囲第56項に記載の方法により製造された装置。

58. 位相共役光を発生するための非線形光学媒質を有する装置を製造するための方法であって、

10 (a) 光ファイバの零分散波長の偏差を測定するステップと、

(b) 上記偏差が予め定められた範囲を超えている場合に上記光ファイバを切断して切断された各ファイバの零分散波長の偏差が上記範囲内に入るようにするステップと、

15 (c) ポンプ光の波長に実質的に等しい零分散波長を有する上記光ファイバ又は上記切断されたファイバを選んで繋ぎ合わせるにより上記非線形光学媒質を得るステップとを備えた方法。

20 59. 請求の範囲第58項に記載の方法により製造された装置。

60. 異なる波長を有する複数の光信号を波長分割多重(WDM)してなるWDM信号光のための複数の光ファイバネットワークと、

25 該複数の光ファイバネットワークを結ぶため

の少なくとも 1 つの変換器とを備え、

該変換器は上記複数の光信号の波長変換及び位相共役変換を一括に行う手段を含む光ファイバ通信システム。

5            6 1.    請求の範囲第 6 0 項に記載のシステムであって、

上記光信号のための光アッド／ドロップ装置を更に備え、

10            該光アッド／ドロップ装置は上記光信号の波形歪みが最も小さくなる位置に設けられるシステム。

6 2.    請求の範囲第 6 0 項に記載のシステムであって、

15            上記波長変換はエルビウムドープファイバ増幅器によって提供される利得帯域に含まれる任意の帯域間で行われるシステム。

6 3.    請求の範囲第 6 2 項に記載のシステムであって、

20            上記任意の帯域は 1 . 5 5  $\mu$  m 帯及び 1 . 5 3  $\mu$  m 帯であるシステム。

6 4.    位相共役光を発生させるための装置であって、

25            第 1 乃至第 4 のポートを有し、該第 1 及び第 2 のポート間並びに該第 3 及び第 4 のポート間は第 1 の偏波面により結合され、該第 1 及び第

3 のポート間並びに該第 2 及び第 4 のポート間  
は第 1 の偏波面に垂直な第 2 の偏波面により結  
合される偏波ビームスプリッタと、

上記第 2 及び第 3 のポート間に動作的に接続  
される非線形光学媒質と、

ポンプ光を出力するポンプ光源と、

信号光及び上記ポンプ光を上記偏波ビームス  
プリッタの上記第 1 のポートに供給するための  
カップリング手段とを備え、

該カップリング手段は、上記信号光及び上記  
ポンプ光をそれぞれ受ける第 1 及び第 2 の入力  
ポート並びに出力ポートを有する光カプラと、  
該出力ポート及び上記第 1 のポート間に動作的  
に接続される偏波保持ファイバとを含む装置。

6 5 . 請求の範囲第 6 4 項に記載の装置  
あって、

上記偏波保持ファイバは上記第 1 のポートに  
おける上記ポンプ光の偏波面が上記第 1 及び第  
2 の偏波面に対して実質的に  $45^\circ$  傾斜するよ  
うに設定される主軸を有している装置。

6 6 . 請求の範囲第 6 5 項に記載の装置  
あって、

上記偏波保持ファイバはスプライス接続され  
た第 1 及び第 2 の偏波保持ファイバからなり、  
該第 1 及び第 2 の偏波保持ファイバは互いに直

交する第 1 及び第 2 の主軸を有している装置。

6 7 . 位相共役光を発生させるための装置であって、

5 第 1 端及び第 2 端を有し該第 1 端には信号光が供給される非線形光学媒質と、

上記第 1 端及び第 2 端の少なくとも何れかからポンプ光を上記非線形光学媒質に供給するためのポンプ光源と、

10 上記非線形光学媒質の上記第 2 端に動作的に接続され上記ポンプ光の波長を含む阻止帯域を有する光帯域阻止フィルタとを備えた装置。

6 8 . 請求の範囲第 6 7 項に記載の装置であって、

15 上記光帯域阻止フィルタに動作的に接続され上記非線形光学媒質内で発生する位相共役光の波長を含む通過帯域を有する光帯域通過フィルタを更に備えた装置。

6 9 . 請求の範囲第 6 7 項に記載の装置であって、

20 上記非線形光学媒質の上記第 1 端に動作的に接続され上記非線形光学媒質内で発生する位相共役光の波長を含む阻止帯域を有する第 2 の光帯域阻止フィルタを更に備えた装置。

25 7 0 . 請求の範囲第 6 7 項に記載の装置であって、

上記非線形光学媒質は光ファイバを含む装置。

7 1 . 請求の範囲第 7 0 項に記載の装置  
あって、

5 上記光ファイバは上記ポンプ光の波長に実質的に等しい零分散波長を有している装置。

7 2 . 請求の範囲第 7 0 項に記載の装置  
あって、

10 上記光ファイバは、該光ファイバが偏波面保持能力を有する程度に該光ファイバの長さを短くするのに十分大きな非線形係数を有している装置。

7 3 . 請求の範囲第 7 2 項に記載の装置  
あって、

15 上記光ファイバは、GeO<sub>2</sub>がドーブされたコアとフッ素がドーブされたクラッドとを含む装置。

7 4 . 請求の範囲第 7 2 項に記載の装置  
あって、

20 上記光ファイバは、シングルモードファイバからなり、該シングルモードファイバは伝送路として使用されるシングルモードファイバのモードフィールド径よりも小さなモードフィールド径を有している装置。

25 7 5 . 光ファイバ伝送路の入力端に接続された光送信装置において、

入力端と出力端とを有し、前記光ファイバ伝送路の中間点と入力端との間の波長分散量と実質的に等しい波長分散量を有する第 1 の光ファイバと、

5 前記第 1 の光ファイバの入力端に光信号を入力する光信号出力手段と、

前記第 1 の光ファイバの出力端からの光信号を、この光信号と位相共役の関係にある位相共役光に変換して、この位相共役光を前記光伝送路の入力端から入力する位相共役器とを備えたことを特徴とする光送信装置。

10

7 6 . 光信号を伝送する光ファイバ伝送路の出力端に接続された光受信装置において、

入力端と出力端とを有し、前記光ファイバ伝送路の中間点と出力端との間の波長分散量と実質的に等しい波長分散量を有する第 2 の光ファイバと、

15

前記光ファイバ伝送路から受信した光信号を、この光信号と位相共役の関係にある位相共役光に変換して、この位相共役光を前記第 2 の光ファイバの入力端に入力する位相共役器と、

20

前記第 2 の光ファイバの出力端からの位相共役光を受信する受信器とを備えたことを特徴とする光送信装置。

25 7 7 . 光ファイバ伝送路の入力端に接続

された光送信装置と該光ファイバ伝送路の出力  
端に接続された光受信装置とを備えた光通信シ  
ステムにおいて、

前記光送信装置は、

5 入力端と出力端とを有し、前記光ファイバ伝  
送路の中間点と入力端との間の波長分散量と実  
質的に等しい波長分散量を有する第1の光ファ  
イバと、

10 前記第1の光ファイバの入力端に光信号を入  
力する光信号出力手段と、

前記第1の光ファイバの出力端からの光信号  
を、この光信号と位相共役の関係にある第1の  
位相共役光に変換して、この第1の位相共役光  
を前記光伝送路の入力端から入力する第1の位  
15 相共役器とを有し、

前記光受信装置は、

20 入力端と出力端とを有し、前記光ファイバ伝  
送路の中間点と出力点との間の波長分散量と実  
質的に等しい波長分散量を有する第2の光ファ  
イバと、

前記光ファイバ伝送路から受信した第1の位  
相共役光を、この位相共役光と位相共役の関係  
にある第2の位相共役光に変換して、この第2  
の位相共役光を前記第2の光ファイバの入力端  
25 に入力する第2の位相共役器と、

前記第 2 の光ファイバの出力端から、該第 2  
の位相共役光を受信する受信器とを備えたこと  
を特徴とする光通信システム。

5

10

15

20

25



FIG. 1

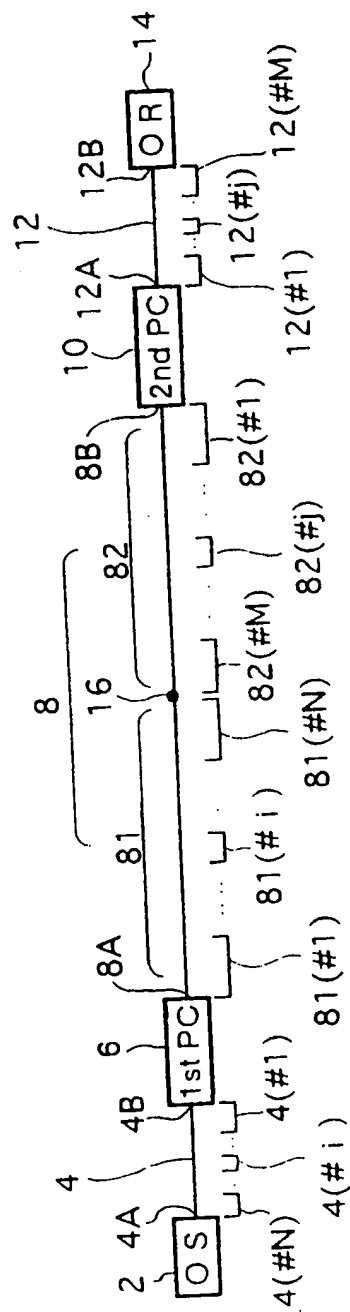


FIG. 2

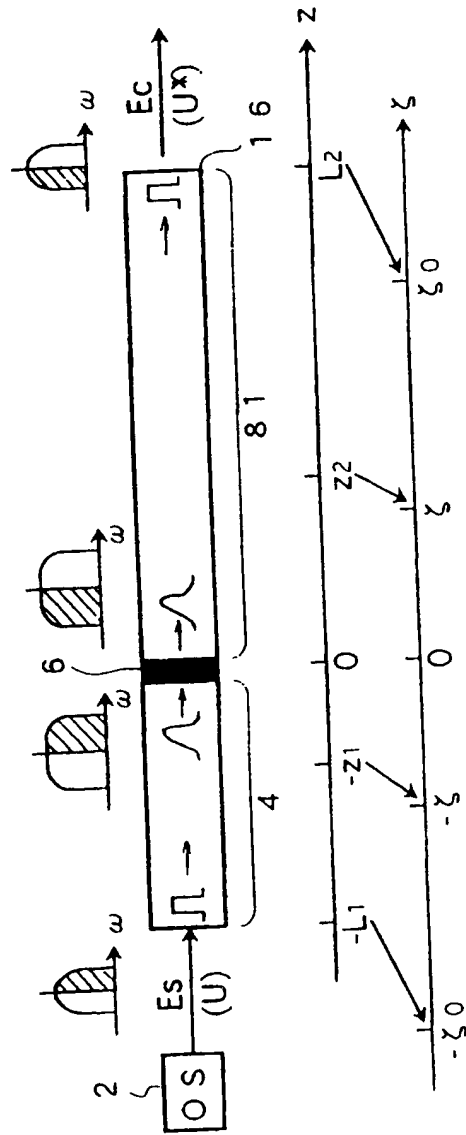
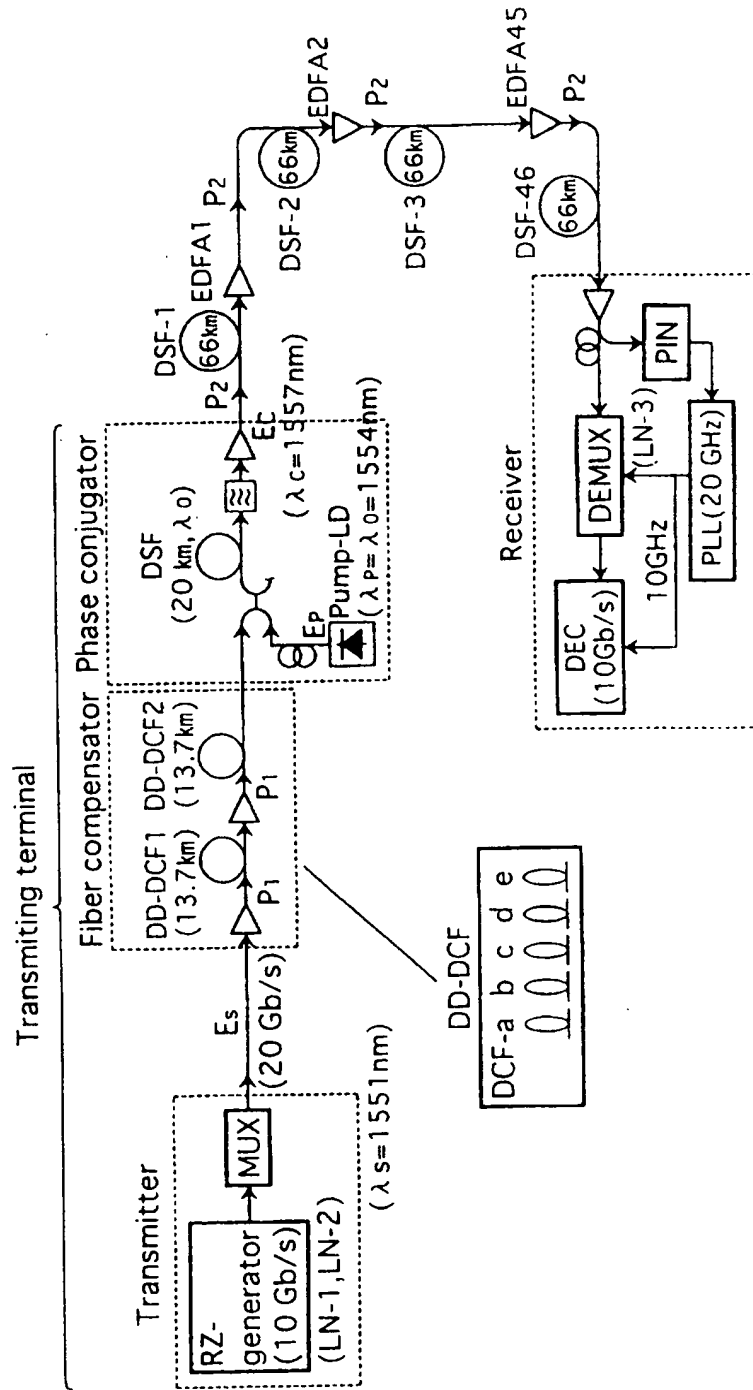


FIG. 3



## FIG. 4

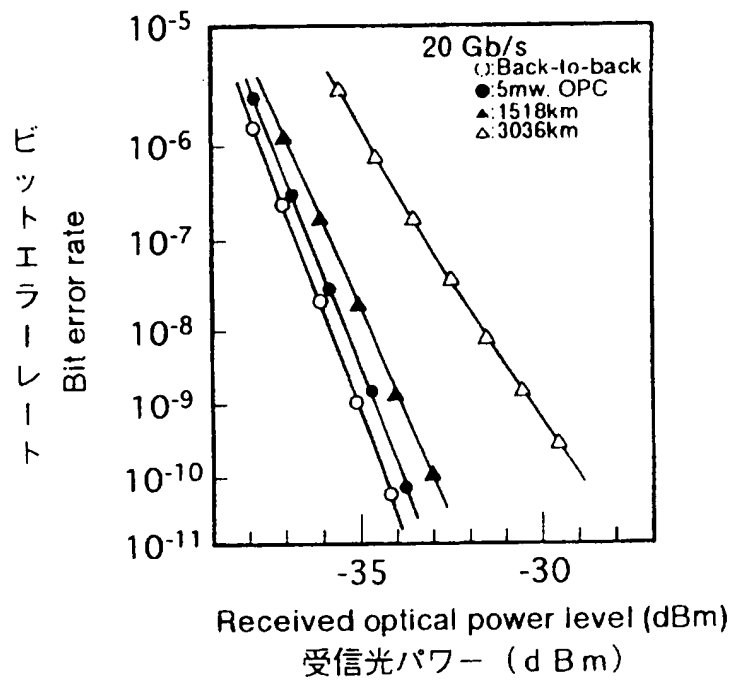


FIG. 5 A

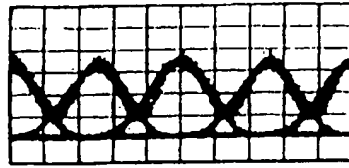


FIG. 5 B



FIG. 5 C



FIG. 5 D



FIG. 5 E



## FIG. 6

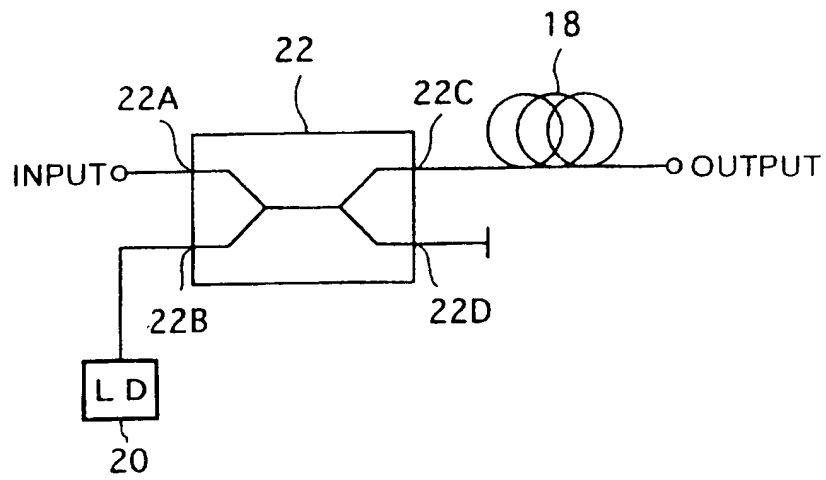


FIG. 7

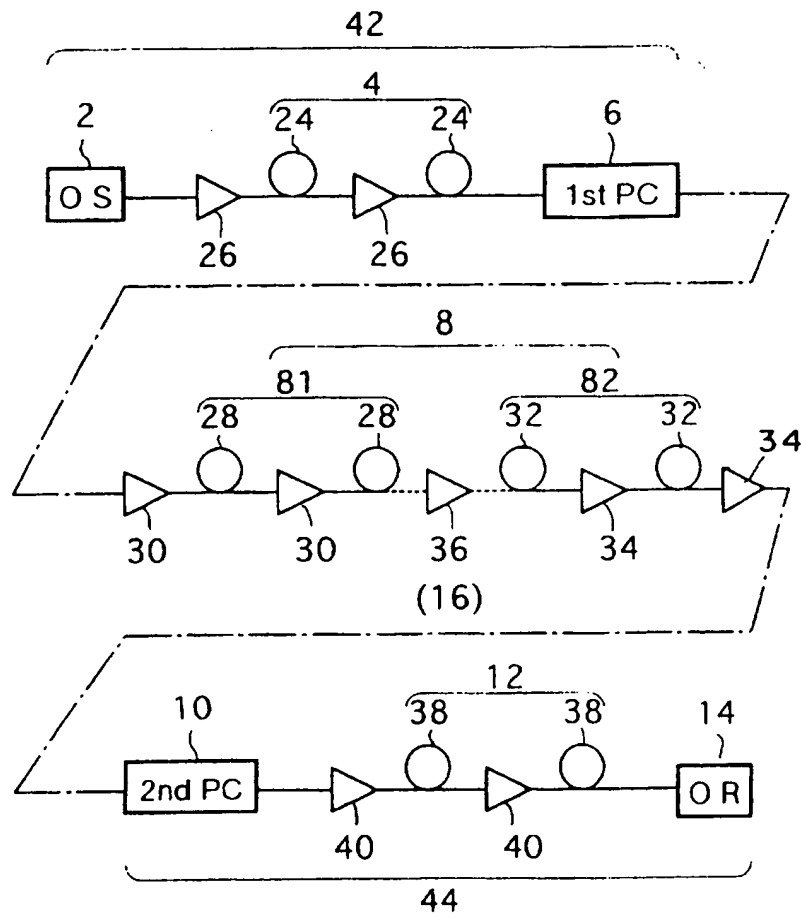


FIG. 8

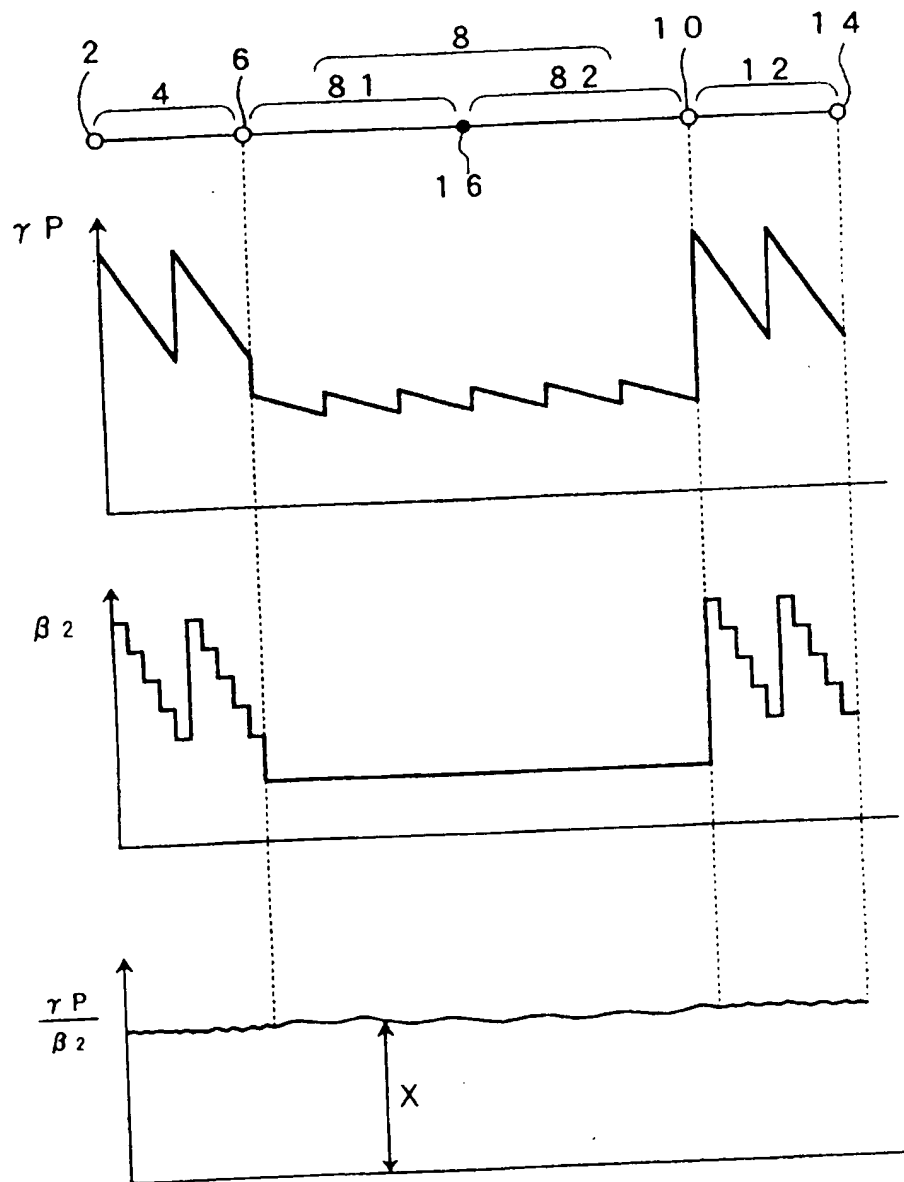




FIG. 9

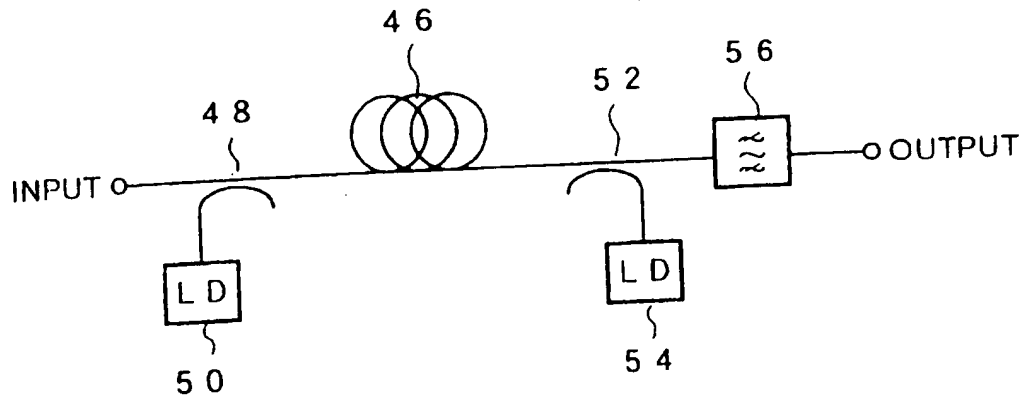


FIG. 10

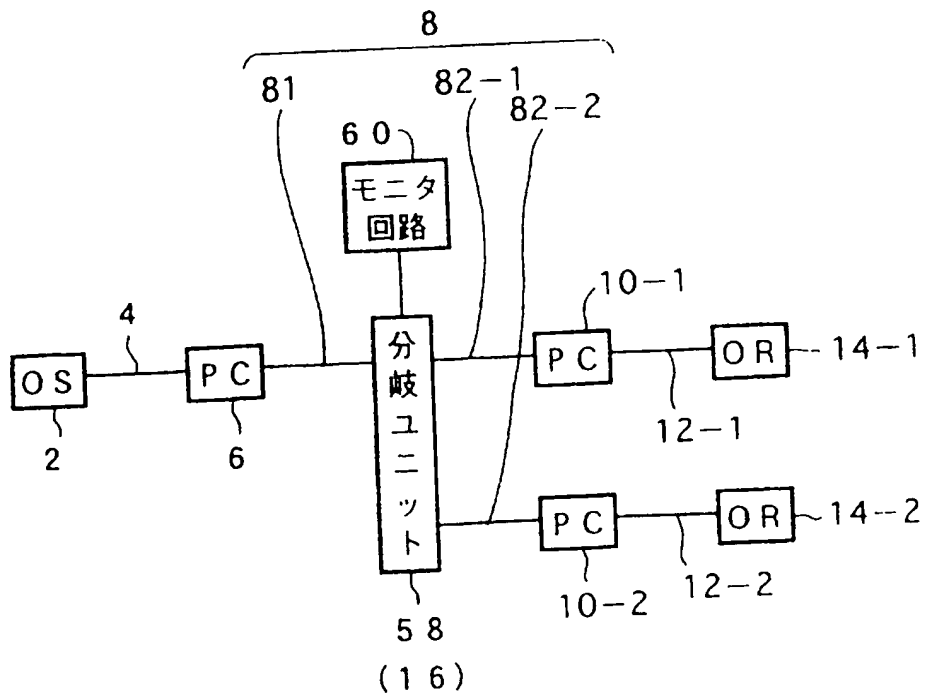


FIG. 11

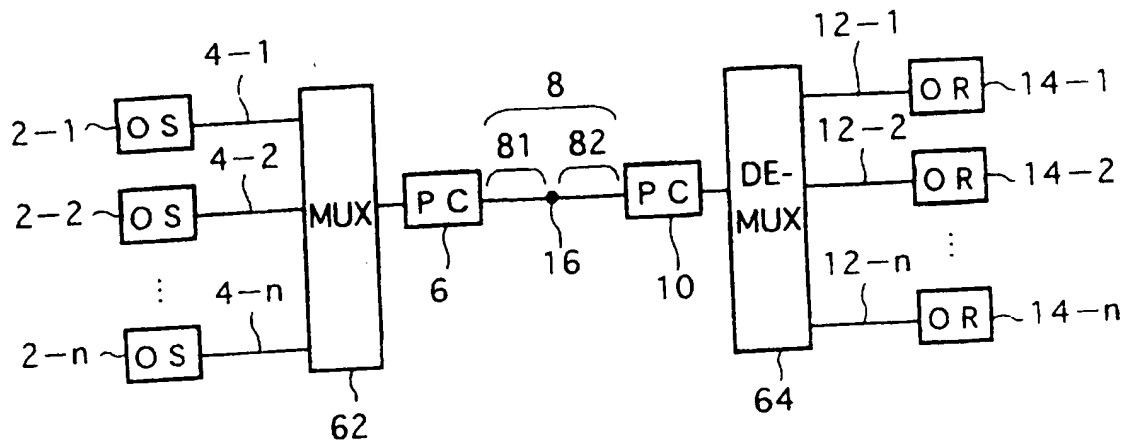


FIG. 12

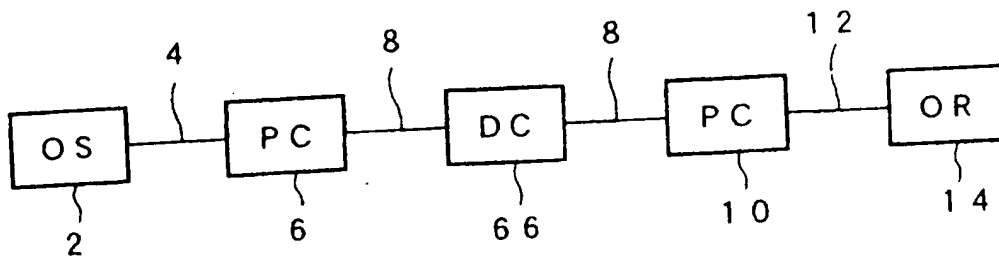


FIG. 13

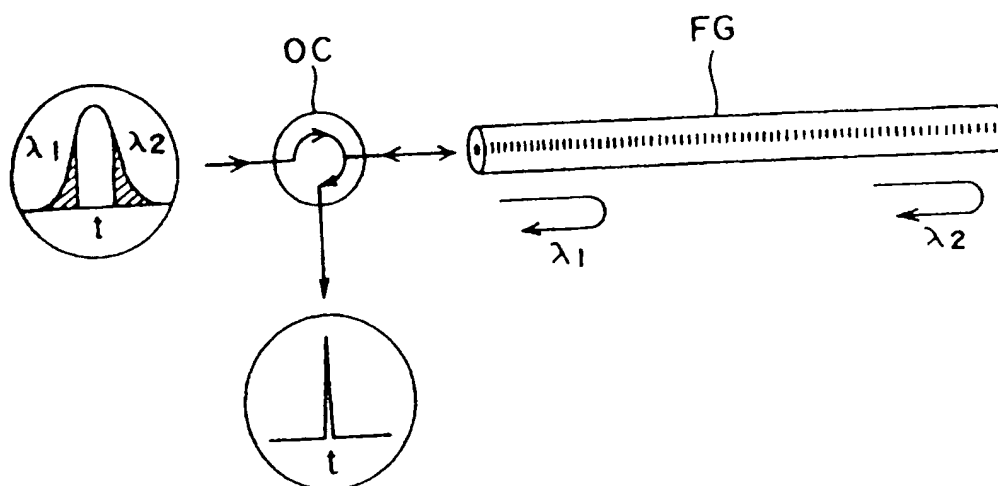


FIG. 14

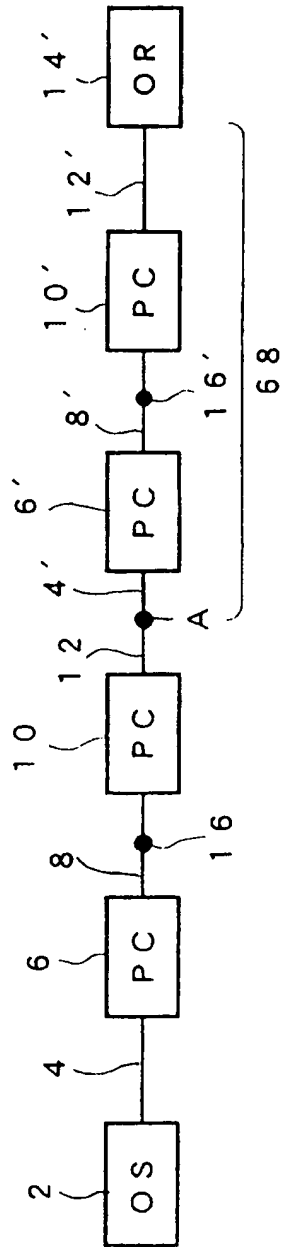


FIG. 15

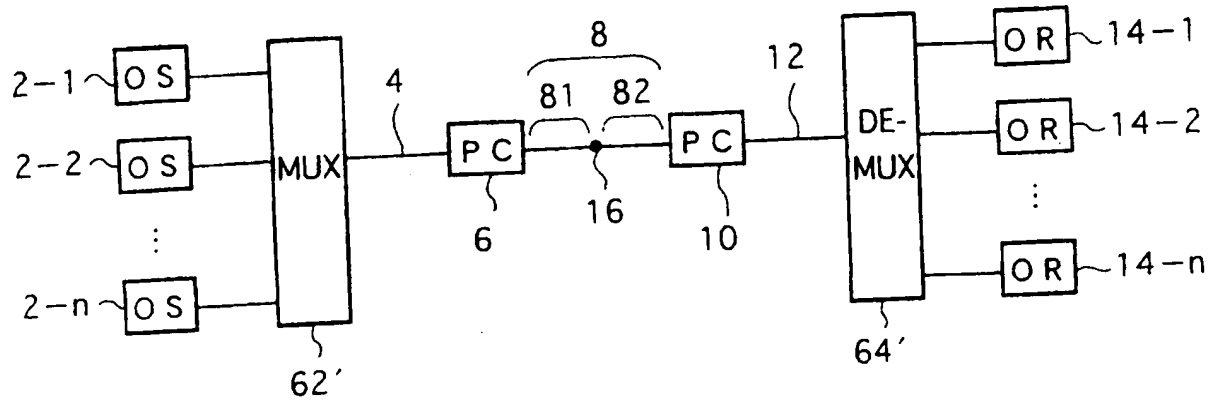


FIG. 16

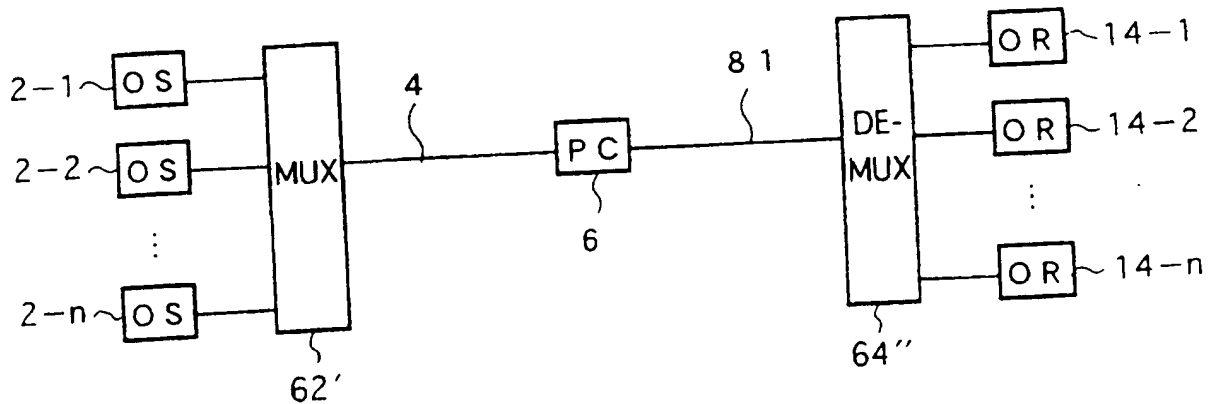


FIG. 17A

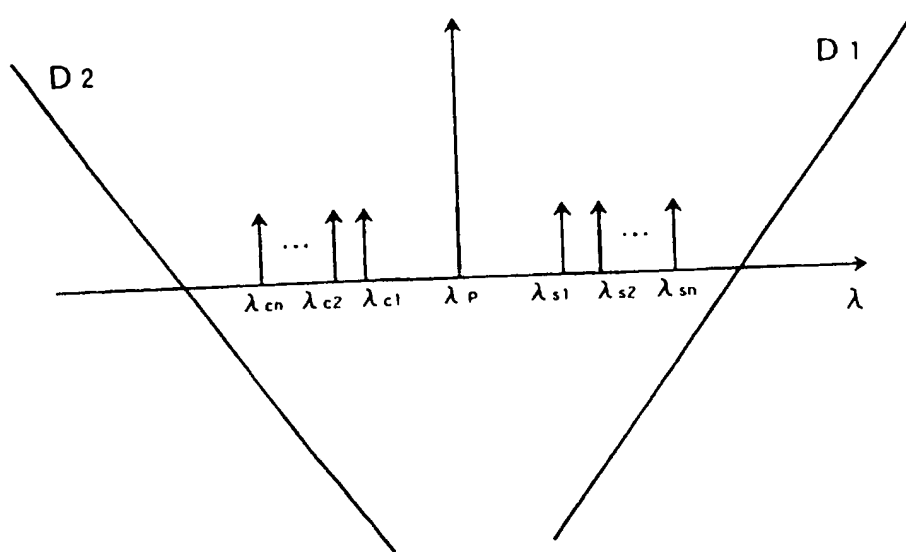


FIG. 17B

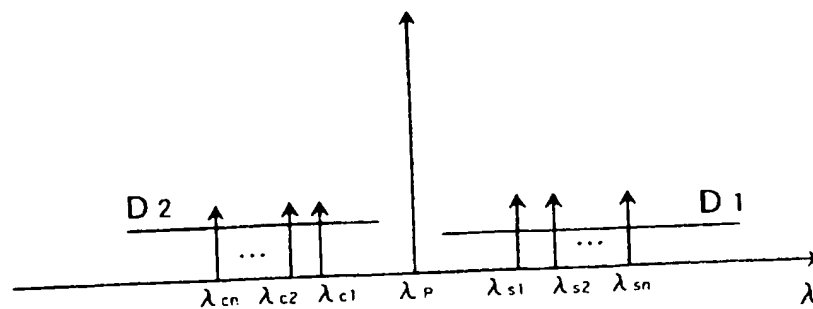


FIG. 18A

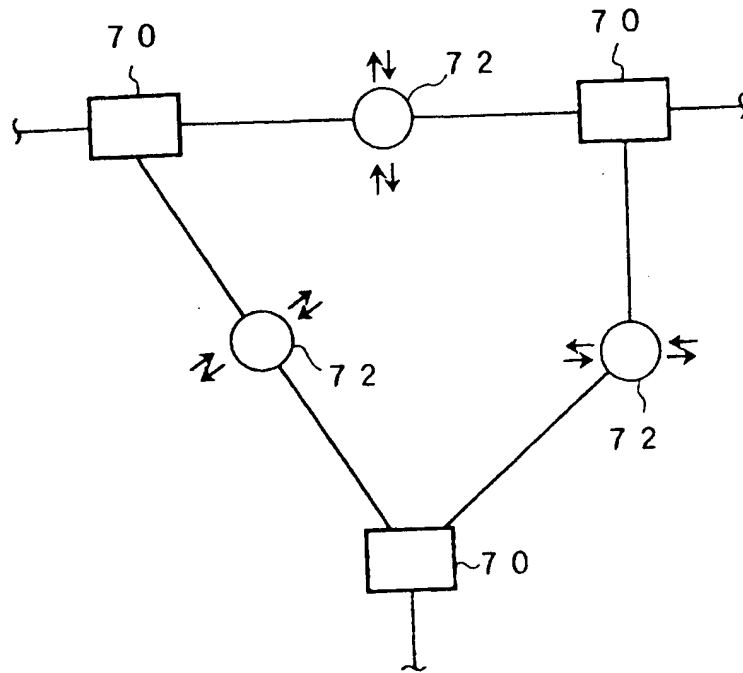
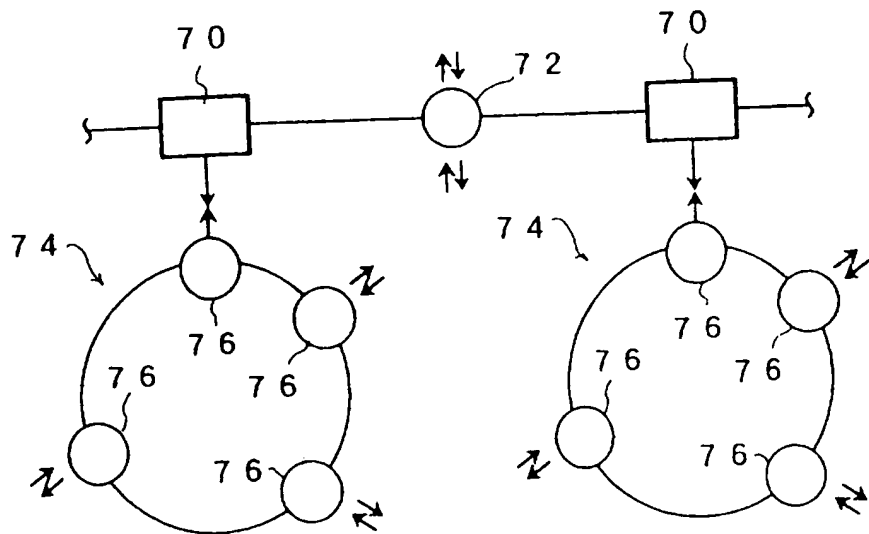


FIG. 18B



## FIG. 19

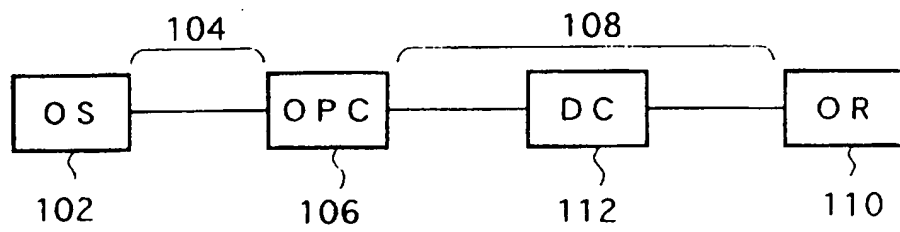




FIG. 20

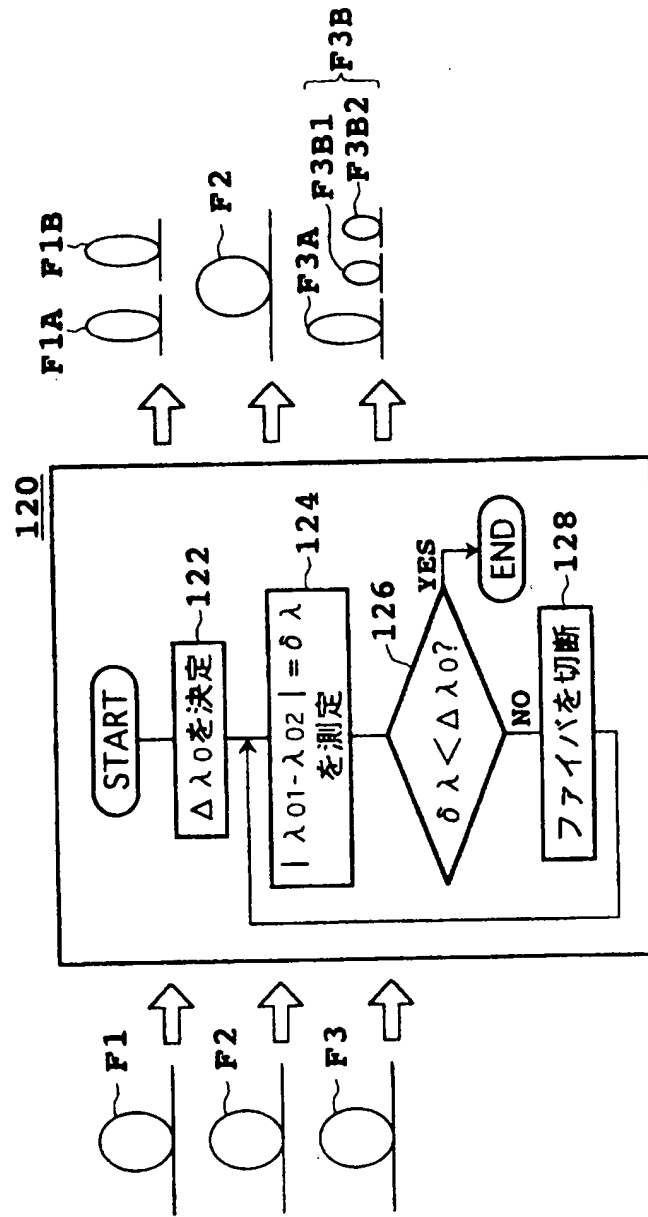
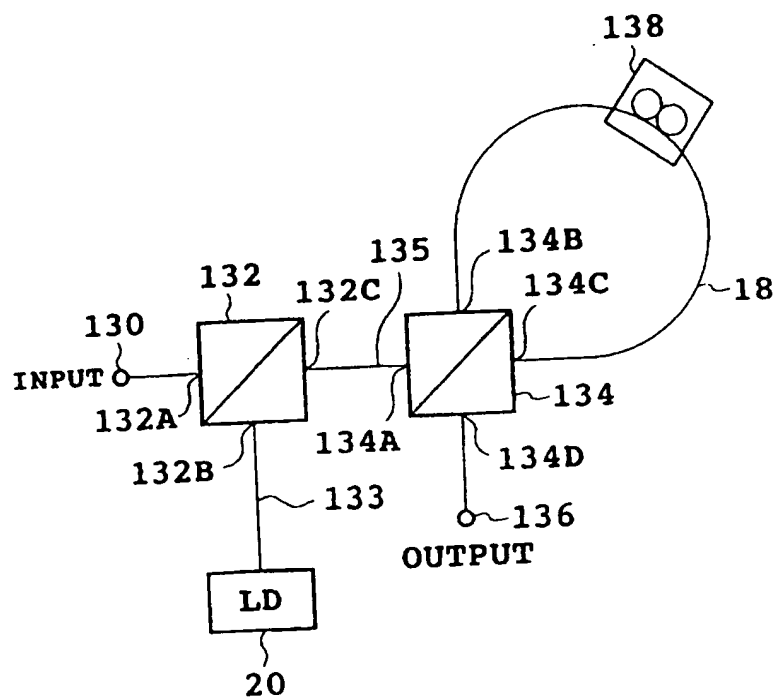


FIG. 21



## FIG. 22

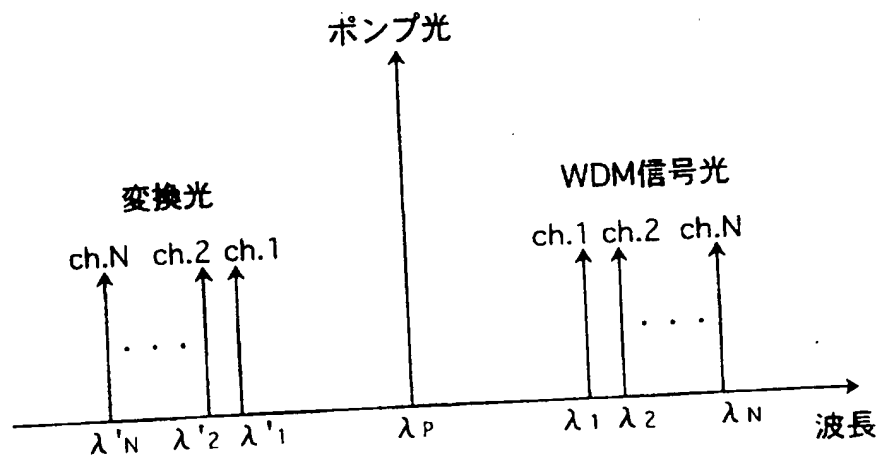


FIG. 23

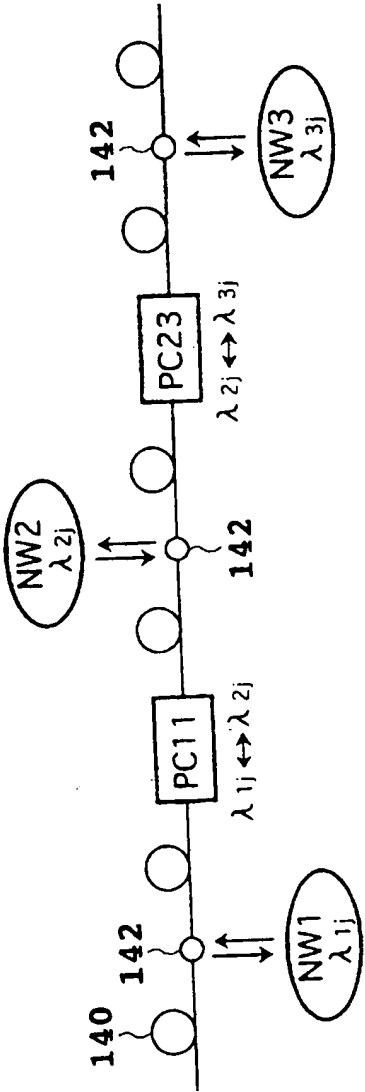


FIG. 24

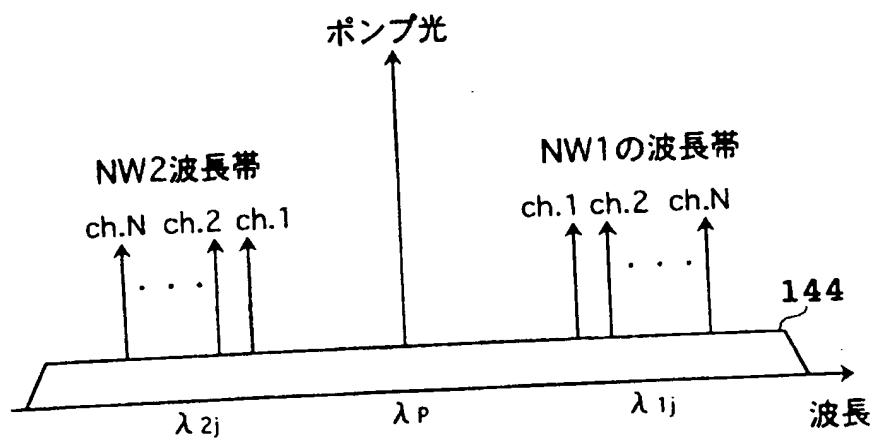


FIG. 25

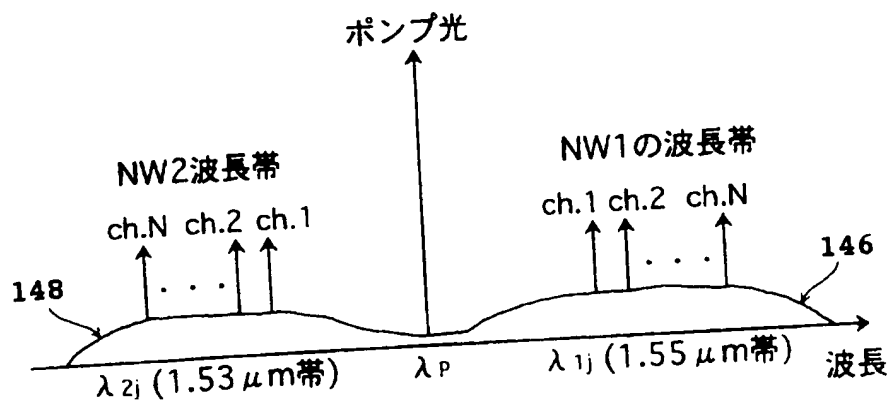


FIG. 26

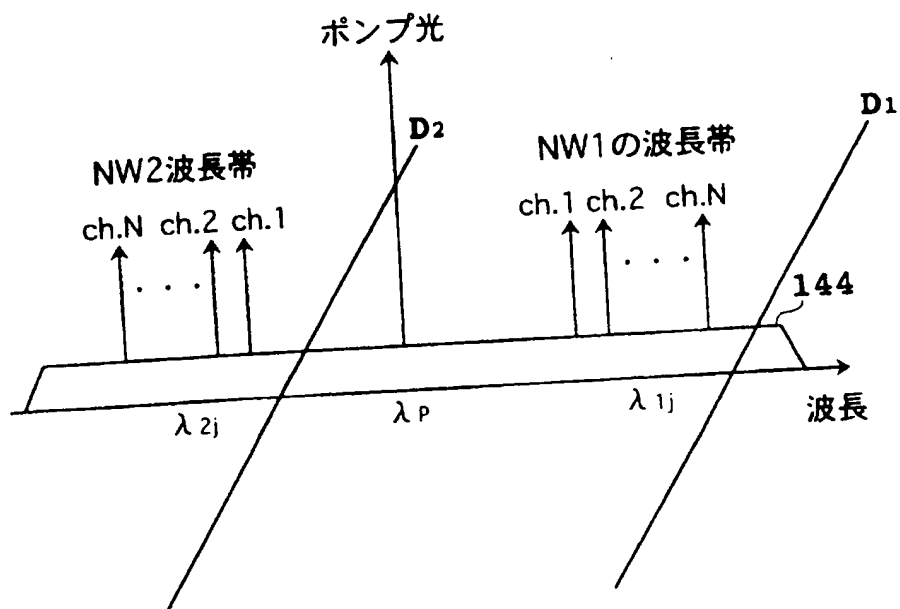


FIG. 27

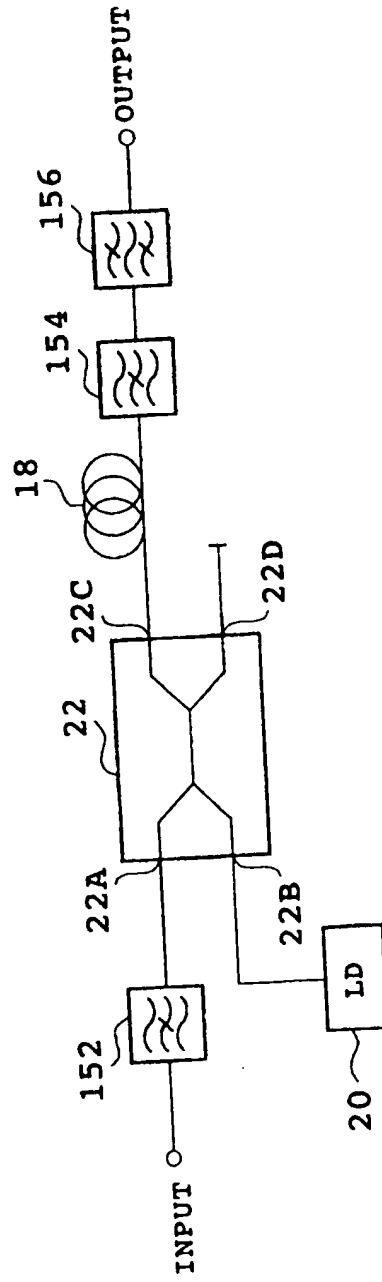




FIG. 28A

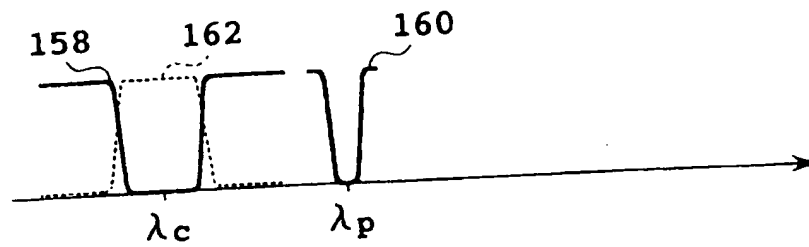


FIG. 28B

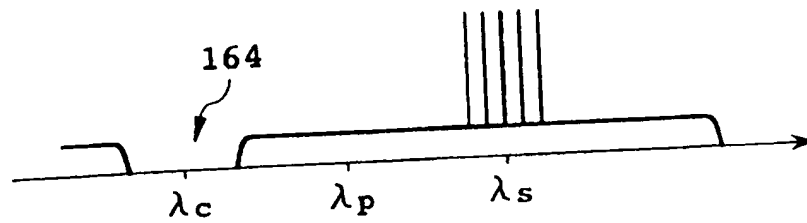


FIG. 28C

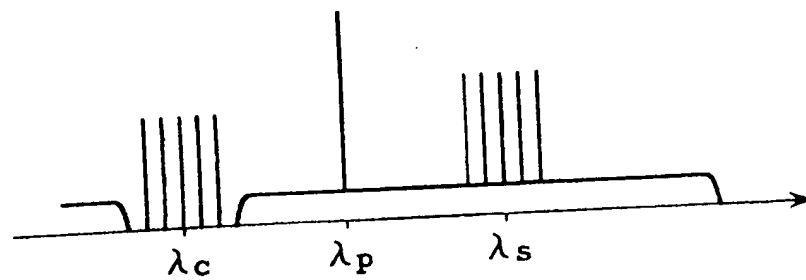
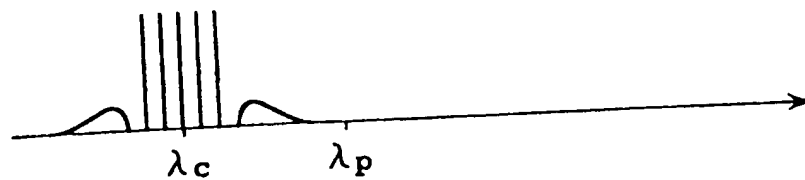


FIG. 28D



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP97/02926

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER  
Int. Cl<sup>6</sup> G02F1/35, H04B10/18

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int. Cl<sup>6</sup> G02F1/35, H04B10/18, G02B6/00Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched  
Jitsuyo Shinan Koho 1940 - 1996 Jitsuyo Shinan Toroku  
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971 - 1997 Koho 1996 - 1997  
Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994 - 1997

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

JICST

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y X	JP, 8-95106, A (AT & T Corp.), April 12, 1996 (12. 04. 96), Full descriptions; Figs. 1 to 7  & US, 5532868, A & EP, 703680, A	1-51, 74-77 67 - 72
Y	Journal of Lightwave Technology Vol. 14, No. 3, March 1996, S. Watanabe, M. Shirasaki, "Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation", P. 243-248	1-51, 75-77
Y	"Laser Study (in Japanese)", Vol. 24, No. 6 (Japan), The Society of Laser Engineers (30. 06. 96), Pages 649 to 655	1-51, 60-63, 75-77 67, 70 71 - 74
X Y	Fig. 5	

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

- "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
- "E" earlier document but published on or after the international filing date
- "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
- "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
- "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&amp;" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
November 18, 1997 (18. 11. 97)Date of mailing of the international search report  
December 2, 1997 (02. 12. 97)Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office  
Facsimile No.

Authorized officer

Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP97/02926

## C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Optics Letters, Vol. 19, No. 17, September 1, 1994, S. Watanabe, "Cancellation of four-wave mixing in a single-mode fiber by midway optical phase conjugation", p. 1308-1310	24, 25, 45-51, 60-63
Y	JP, 7-301830, A (Fujitsu Ltd.), November 14, 1995 (14. 11. 95), Full descriptions	24, 25, 45-51, 60-63
X	Figs. 16, 17	64, 65
Y		66
X	Fig. 13	67, 70-72, 74
Y	(Family: none)	68, 69, 73
X	JP, 5-323396, A (Nippon Telegraph & Telephone Corp.), December 7, 1993 (07. 12. 93), Full descriptions; Figs. 1 to 3 (Family: none)	64 - 66
Y	JP, 60-173504, A (Nippon Telegraph & Telephone Corp.), September 6, 1985 (06. 09. 85), Full descriptions; Figs. 1 to 5 (Family: none)	52 - 59
Y	JP, 62-159104, A (Hitachi Cable, Ltd.), July 15, 1987 (15. 07. 87), Full descriptions (Family: none)	52 - 59

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl<sup>6</sup> G02F1/35, H04B10/18

B. 調査を行った分野  
調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))  
Int. Cl<sup>6</sup> G02F1/35, H04B10/18, G02B6/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの  
日本国実用新案公報 1940-1996  
日本国公開実用新案公報 1971-1997  
日本国登録実用新案公報 1994-1997  
日本国実用新案登録公報 1996-1997

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)  
JICST

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y X	JP, 8-95106, A (エイ・ティ・アンド・ティ・コーポレーション) 12. 4月. 1996 (12. 04. 96) 全文、第1-7図  & US, 5532868, A & EP, 703680, A	1-51, 74-77 67-72
Y	Journal of Lightwave Technology Vol. 14, No. 3, March 1996, S. Watanabe, M. Shirasaki, "Exact Compensation for both Chromatic Dispersion and Kerr Effect in a Transmission Fiber Using Optical Phase Conjugation", P. 243-248	1-51, 75-77

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

\* 引用文献のカテゴリー

- 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの。  
「E」 先行文献ではあるが、国際出願日以後に公表されたもの。  
「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

- の日の後に公表された文献  
「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの  
「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの  
「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの  
「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 18. 11. 97

国際調査報告の発送日 02.12.97

国際調査機関の名称及びあて先  
日本国特許庁 (ISA/J P)  
郵便番号 100  
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)  
佐藤 宙子

2K 9316

電話番号 03-3581-1101 内線 3254

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y X Y	レーザー研究, 第24巻, 第6号 (日) 社団法人レーザー学会, (30.06.96) 第649-655頁  第5図	1-51, 60-63, 75-77 67, 70 71-74
Y	Optics Letters, Vol. 19, No. 17, September 1, 1994, S. Watanabe, "Cancellation of four-wave mixing in a single-mode fiber by midway optical phase conjugation", p. 1308-1310	24, 25, 45-51, 60-63
Y  X Y X Y	JP, 7-301830, A(富士通株式会社) 14. 11月. 1995(14. 11. 95) 全文  第16, 17図  第13図  (パテントファミリーなし)	24, 25, 45-51, 60-63 64, 65 66 67, 70-72, 74 68, 69, 73
X	JP, 5-323396, A(日本電信電話株式会社) 7. 12月. 1993(07. 12. 93) 全文、第1-3図 (パテントファミリーなし)	64-66
Y	JP, 60-173504, A(日本電信電話株式会社、日本大洋海底電線株式会社) 6. 9月. 85(06. 09. 85) 全文、第1-5図 (パテントファミリーなし)	52-59
Y	JP, 62-159104, A(日立電線株式会社) 15. 7月. 87(15. 07. 87) 全文 (パテントファミリーなし)	52-59